



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATERS STRUCTURES

STUDIE PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ  
V LOKALITÁCH PISÁRKY A STARÉ BRNO NA SVRATCE

FEASIBILITY STUDY OF THE FLOOD PROTECTION MEASURES IN THE LOCALITIES  
OF PISÁRKY AND STARÉ BRNO AT THE SVRATKA RIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. JAN CHARVÁT

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. ALEŠ DRÁB, PH.D.

BRNO 2017



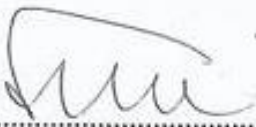
## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVISTĚ	Ústav vodních staveb

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Jan Charvát
NÁZEV	Studie protipovodňových opatření v lokalitách Pisárky a Staré Brno na Svatce
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

  
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu



  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- Odborná literatura, normy a dokumenty související s problematikou ochrany před povodněmi
- Geodetické zaměření zájmových úseků vodních toků
- Hydrologická data
- Mapové podklady

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Cílem práce je návrh jedné varianty technických protipovodňových opatření v lokalitách Pisárky a Staré Brno na Svatce. Součástí práce je realizace hydraulických výpočtů proudění vody v toku a záplavovém území s použitím 1D, popř. 2D numerického modelu. Výstupy práce budou obsahovat:

- průvodní a technickou zprávu;
- fotodokumentaci;
- výsledky hydraulických výpočtů proudění vody pro zájmové úseky toků a záplavová území ve formě map povodňového nebezpečí;
- výkresovou část zahrnující situaci širších vztahů, celkovou situaci stavby, podélné a příčné profily se zakreslením navrhovaných protipovodňových opatření.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

**VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:**

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13.1.2017

.....

podpis autora

Jan Charvát

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13.1.2017

.....  
podpis autora

Jan Charvát

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu doc. Ing. Aleši Drábovi Ph.D. za ochotu, trpělivost, odborné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce.

Bc. Jan Charvát

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá posouzením stávajícího stavu území v lokalitě Brno, městská část Pisárky a Staré Brno, na řece Svratce v km 37,053 – 41,116 a následným návrhem a posouzením povodňové ochrany. Hydraulické výpočty byly provedeny pomocí spřaženého 1D/2D numerického modelu proudění vody pro průchod kulminačních průtoků  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{100}$  neovlivněný. Výsledky jsou zpracovány v podobě map rozlivů a výkresové dokumentace.

## Klíčová slova

povodeň, protipovodňová opatření, spřažený 1D/2D numerický model, Brno, Svratka

## Abstract

This thesis deals with the assessment of the current state of flood protection in Brno, Pisárky and the Staré Brno district on the Svratka river at km 37.053 to 41.116 and the subsequent design and assessment of flood protection measures. Hydraulic calculations were carried out using the coupled 1D / 2D numerical model of water flow to pass peak flows  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{100}$  unaffected. The results are processed in the form of inundation maps and drawing documentation.

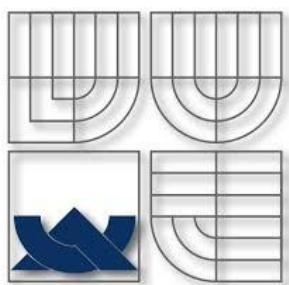
## Keywords

flood, flood protection measures, coupled 1D / 2D numerical model, Brno, Svratka

## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Jan Charvát: *Studie protipovodňových opatření v lokalitách Pisárky a Staré Brno na Svatce*. Brno, 2017. 58 stran, 114 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.





**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

## **STUDIE PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ V LOKALITÁCH PISÁRKY A STARÉ BRNO NA SVRATCE**

FEASIBILITY STUDY OF THE FLOOD PROTECTION MEASURES IN PISÁRKY AND OLD  
BRNO ON SVRATKA

### **A. TECHNICKÁ ZPRÁVA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

VYPRACOVAL:

Bc. Jan Charvát

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE:

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2017

## OBSAH:

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>2</b>
<b>3. PODKLADY .....</b>	<b>3</b>
3.1. PODKLADY K ZÁJMOVÉ LOKALITĚ.....	3
3.2. LEGISLATIVA.....	4
3.3. OSTATNÍ.....	5
3.4. ZHODNOCENÍ PODKLADŮ .....	5
3.4.1. Podklady pro 1D model.....	5
3.4.2. Podklady pro 2D model.....	8
3.4.3. Podklady pro návrh PPO.....	8
3.4.4. Místní šetření .....	8
<b>4. NÁSTROJE ŘEŠENÍ .....</b>	<b>9</b>
4.1. BASEMENT .....	9
4.2. QGIS.....	9
<b>5. POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ.....</b>	<b>10</b>
5.1. VYMEZENÍ A CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ .....	10
5.2. ŘEKA SVRATKA.....	11
5.3. HYDROLOGICKÉ ÚDAJE.....	11
5.3.1. Stanice Brno - Poříčí .....	11
5.3.2. Povodí Moravy s.p. ....	12
5.4. OBJEKTY NA VODNÍM TOKU .....	13
5.4.1. Limnigrafická stanice Brno – Poříčí .....	13
5.4.2. Jez Riviéra .....	13
5.4.3. Dnový práh km 38,251 .....	14
5.4.4. Dnový práh km 37,428 .....	14
5.4.5. Silniční most Pisárky .....	14
5.4.6. Silniční most Okruh .....	15
5.4.7. Lávka pro pěší Riviéra .....	15
5.4.8. Lávka pro pěší Poříčí .....	15
5.4.9. Silniční most Vídeňská.....	15
5.4.10. Lávka pro pěší Vídeňská.....	15
5.4.11. Silniční most Renneská.....	16
5.4.12. Silniční most Heršpická.....	16

5.4.13. Železniční most Poříčí.....	16
5.5. HISTORICKÉ POVODNĚ .....	16
5.5.1. Povodeň v roce 1997 .....	17
5.5.2. Povodeň v roce 2006 .....	17
<b>6. POPIS NAVRHOVANÝCH PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ .....</b>	<b>18</b>
6.1. TYPY PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ.....	18
6.2. PRAVÝ BŘEH.....	18
6.2.1. Železobetonová zídka SO 1.1 - SO 1.4 .....	18
6.3. LEVÝ BŘEH .....	20
6.3.1. Železobetonová zídka SO 2.1 - SO 2.6 .....	20
6.3.2. Ochranná sypaná hráz SO 3.....	21
6.3.3. SO 4 – Mobilní hrazení.....	22
<b>7. POPIS KONCEPCE HYDRAULICKÝCH VÝPOČTŮ .....</b>	<b>23</b>
7.1. CÍLE VÝPOČTŮ .....	23
7.2. KONCEPČNÍ MODEL .....	23
7.3. MATEMATICKÝ POPIS MODELU .....	25
7.3.1. 1D model .....	25
7.3.2. 2D model .....	27
7.4. OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY .....	28
7.5. VÝPOČTOVÁ SÍŤ .....	28
7.6. DRSNOSTI KORYTA A ZÁPLAVOVÝCH ÚZEMÍ .....	28
7.7. NEJISTOTY VSTUPNÍCH DAT .....	29
7.7.1. Velikost buňky výpočetní sítě .....	29
7.7.2. Digitální model terénu .....	30
7.7.3. Součinitel drsnosti a přesnost hydrologických údajů.....	30
7.7.4. Hydrologická data .....	30
7.8. KALIBRACE MODELU.....	30
<b>8. POSTUP HYDRAULICKÝCH VÝPOČTŮ .....</b>	<b>31</b>
8.1. GEOMETRIE 1D MODELU .....	34
8.2. GEOMETRIE 2D MODELU .....	36
8.3. SPŘAŽENÍ 1D/2D MODELU.....	38
8.4. ZOBRAZENÍ VÝSTUPŮ .....	40
<b>9. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ.....</b>	<b>41</b>
9.1. STÁVAJÍCÍ STAV .....	41

9.1.1. Průtok $Q_1$ .....	41
9.1.1. Průtok $Q_5$ .....	41
9.1.2. Průtok $Q_{20}$ .....	41
9.1.3. Průtok $Q_{100}$ .....	41
9.1.4. Průtok $Q_{100N}$ .....	42
9.2. NÁVRHOVÝ STAV .....	42
9.2.1. Průtok $Q_{100N}$ .....	42
<b>10. CELKOVÉ HODNOCENÍ A ZÁVĚR .....</b>	<b>43</b>
<b>11. SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>44</b>
<b>12. SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>45</b>
<b>14. SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>46</b>

# 1. Úvod

Město Brno je ohroženo přirozenými povodněmi na vodních tocích Svitavě a Svratce, které mohou být způsobeny například vydatnými dešťovými srážkami, náhlým táním sněhové pokrývky nebo ledovými jevy. Při těchto povodňových situacích může dojít ke značným škodám na majetku a ohrožení lidského zdraví. Proto je potřeba zajistit ochranu obyvatel a majetku vybudováním vhodných protipovodňových opatření.

Zájmová lokalita se nachází v Brně, městských částech Pisárky a Staré Brno, na toku řeky Svratky v km 37,053 – 41,116. Tato práce se zabývá posouzením současného a návrhového stavu povodňové ochrany zájmové lokality. Návrh protipovodňových opatření vychází z koncepce Generelu odvodnění města Brna [1], ve kterém byl zpracován předběžný návrh protipovodňových opatření pro město Brna. Vyhodnocení povodňových scénářů bylo realizováno pomocí spřaženého 1D/2D numerického modelu.

## 2. Cíle práce

Cílem této práce je hydraulické posouzení zájmové lokality pro stávající stav, návrh protipovodňových opatření a následné posouzení stavu s navrženými protipovodňovými opatřeními. Zájmová lokalita se nachází v Brně v městské části Pisárky a Staré Brno, na řece Svatce v km 37,053 – 41,116.

Předmětem této práce je hydraulický výpočet proudění vody s využitím spřaženého 1D/2D numerického modelu proudění, k jehož řešení byl zvolen volně šiřitelný software BASEMENT. Nejprve byl zpracován hydrodynamický model pro stávající stav zájmové lokality bez protipovodňových opatření pro povodňové scénáře, které odpovídají kulminačním průtokům  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$  a  $Q_{100}$  a  $Q_{100}$  neovlivněný (Dále jen  $Q_{100N}$ ). Poté byla do výpočtového modelu přidána protipovodňová opatření, vycházející z Generelu odvodnění města Brna [1] a provedeny simulace pro všechny výše zmíněné povodňové scénáře. Výsledky hydraulických výpočtů byly zpracovány do podoby map rozlivů, rychlostí a hloubek. Dále byla vytvořena situace navržených protipovodňových opatření, vzorové příčné řezy a podélný profil toku v zájmové lokalitě, kde jsou zobrazeny průběhy výšek hladin pro jednotlivé scénáře a niveleta navržených opatření.

## 3. Podklady

### 3.1. Podklady k zájmové lokalitě

- [1] Generel odvodnění města Brna, část vodní toky. Magistrát města Brna, 2008.
- [2] Podélný profil toku Svratky KM 33,537 - KM 40,352 a KM 40,349 - KM 47,810, Povodí Moravy, státní podnik, červen 2007
- [3] Příčné řezy toku Svratky KM 33,537 - KM 40,352 a KM 40,349 - KM 47,810, Povodí Moravy, státní podnik, červen 2007
- [4] Situace toku Svratky KM 33,537 - KM 40,352 a KM 40,349 - KM 47,810, Povodí Moravy, státní podnik, červen 2007
- [5] Evidenční list hlásného profilu č. 375 – stanice Brno - Poříčí, ČHMÚ. [Online] 1.12.2016.  
Dostupné z: [http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps\\_prfbk\\_detail.php?seq=307205](http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307205)
- [6] Wikipedie. [Online] 2.12.2016. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org>
- [7] Digitální model reliéfu České Republiky 5. generace, Český úřad zeměměřický a katastrální. [Online] 14.10.2016.  
Dostupné z: [http://ags.cuzk.cz/arcgis/services/3D/dmr5g\\_sitsk/ImageServer](http://ags.cuzk.cz/arcgis/services/3D/dmr5g_sitsk/ImageServer)
- [8] Prohlížeč služba WMS – ZM10, Základní mapa ČR 1:10 000, Český úřad zeměměřický a katastrální. [Online] 14.10.2016.  
Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/WMS\\_ZM10\\_PUB/WMSservice.aspx](http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM10_PUB/WMSservice.aspx)
- [9] Prohlížeč služba WMS ORTOFOTO, rastrová mapa ČR, Český úřad zeměměřický a katastrální. [Online] 14.10.2016.  
Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/WMS\\_ORTOFOTO\\_PUB/WMSservice.aspx](http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx)
- [10] Centrální datový sklad pro mapy povodňového nebezpečí a povodňových rizik. [Online] 5.11.2016. Dostupné z: <http://cds.chmi.cz/?lang=cs>
- [11] Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.M. [Online] 16.10.2016.  
Dostupné z: <http://www.dibavod.cz>
- [12] Místní šetření zájmové lokality provedené autorem práce dne 22. 6. 2016.
- [13] Brázdil, R., aj. Povodně v Brně. Historie povodní, jejich příčiny a dopady. Brno: Archiv města Brna, 2010.

[14] Mapy.cz [Online] 5.12.2016. Dostupné z: <http://www.mapy.cz>

### 3.2. Legislativa

ČSN 73 6530 Názvosloví hydrologie.

ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod.

ČSN 75 2310 Sypané hráze.

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.

TNV 75 2102 Úpravy potoků.

TNV 75 2103 Úpravy řek.

TNV 75 2415 Suché nádrže.

TNV 75 2931 Povodňové plány.

TNV 75 2932 Navrhování záplavových území.

TNV 75 2910 Manipulační řády vodohospodářských děl na vodních tocích.

Zákon 240/2000 Sb. o krizovém řízení a změně některých zákonů (krizový zákon).

Zákon 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon).

Zákon 114/1992 Sb. o ochraně přírody a krajiny.

Směrnice 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.

Nařízení vlády 462/2000 Sb. k provedení §28 odst. 8 a §28 odst. 5 zákona 240/2000 Sb. o krizovém řízení.

Vyhláška MŽP 236/2002 Sb. o způsobu a rozsahu zpracovávání návrhu a stanovování záplavových území.

Vyhláška 470/2001 Sb., kterou se stanoví seznam významných vodních toků a způsob provádění činností souvisejících se správou vodních toků.

Vyhláška 142/2005 Sb. o plánování v oblasti vod.

Plán hlavních povodí ČR, Ministerstvo zemědělství, Praha, 23. 5. 2007.

Usnesení vlády 382/2000 k Návrhu strategie ochrany před povodněmi pro území ČR.

*Pozn. U uvedených zákonů, nařízení a vyhlášek se předpokládá jejich platné znění.*



### 3.3. Ostatní

[A] ETH - D-BAUG - VAW - BASEMENT. [Online] 25.10.2016.

Dostupné z: [www.basement.ethz.ch](http://www.basement.ethz.ch)

[B] QGIS: A Free and Open Source Geographic Information System. [Online]

23.10.2016. Dostupné z: <http://www.qgis.org/en/site>

[C] JANDORA, J., ŠULC, J.: Hydraulika, modul 01, studijní opora FAST VUT v Brně, Brno, 2006.

[D] KACÁLEK, Tomáš: Studie proveditelnosti protipovodňových opatření. Brno, 2014. 63 s., 37 příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.

### 3.4. Zhodnocení podkladů

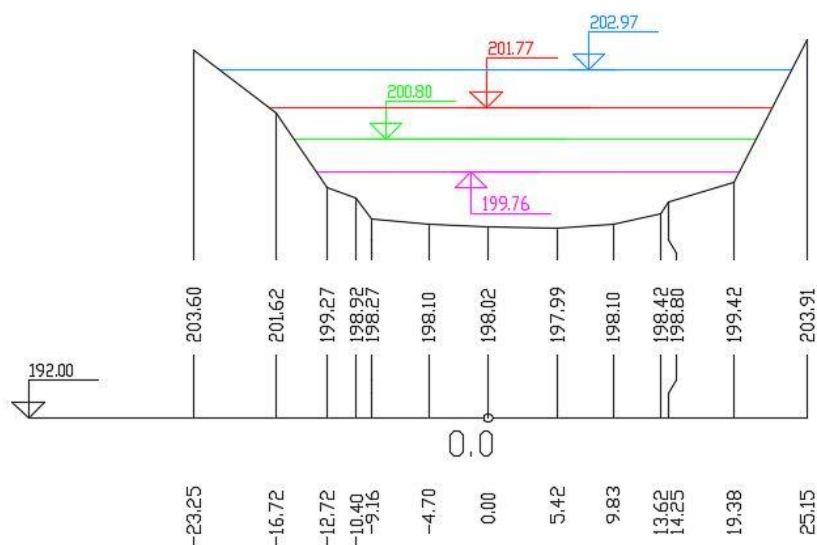
Pro úspěšné zpracování této práce bylo nutné shromáždit různé druhy podkladů. Jednalo především o data potřebná k výpočtu spřaženého 1D/2D numerického modelu, které zahrnovaly příčné profily toku v zájmové lokalitě [3], podélný profil toku v zájmové lokalitě [2], situaci toku v zájmovém území [4] a digitální model terénu zájmové oblasti [7].

#### 3.4.1. Podklady pro 1D model

1D model vycházel z geodeticky zaměřených příčných profilů toku Svratky [3], podélného profilu toku Svratky [2] s vykreslenými hladinami kulminačních průtoků  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{10}$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{100N}$  a situace území [4] ve formátu \*.dxf.

Některé příčné profily byly upraveny odstraněním krajních bodů za břehovou hranou, protože tato oblast bude řešena v 2D modelu. Jelikož příčné řezy neobsahovaly informace o přesných souřadnicích jednotlivých lomových bodů profilu, ale pouze staničení, kde se daný profil nachází, bylo nutné doplnit tyto informace manuálně. Pro zadání do softwaru BASEMENT bylo potřeba zjistit souřadnice bodu na levé břehové hraně. Tyto souřadnice byly získány v programu ArcMap. Nejprve se otevřela situace s vyznačeným umístěním profilů v příslušném staničení, viz obr. 3.2, pod kterou se podložila ortofoto mapa [9]. Průsečík levé břehové hrany a příslušného profilu by určen podle ortofoto mapy a následně z něj byly odečteny požadované souřadnice.

PF 331 KM 38.9680



LEGENDA:

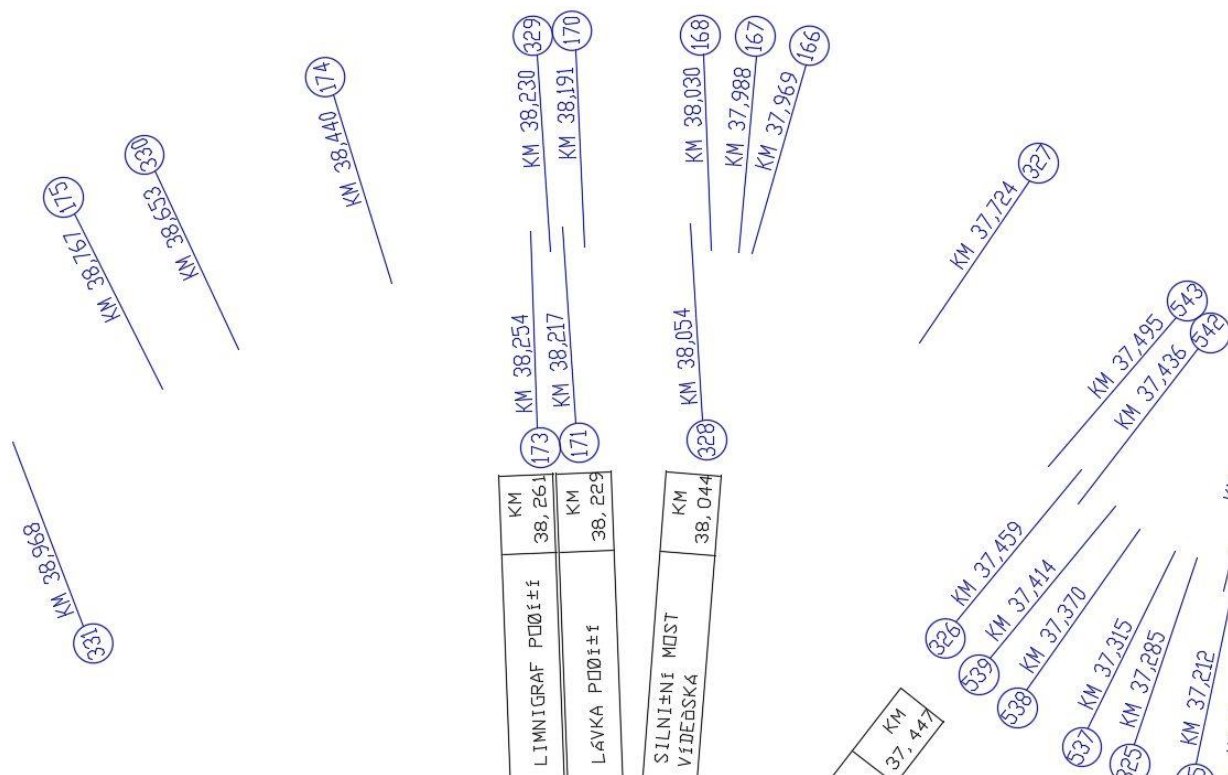
Hladina Q100 Svratka

Hladina Q20 Svratka

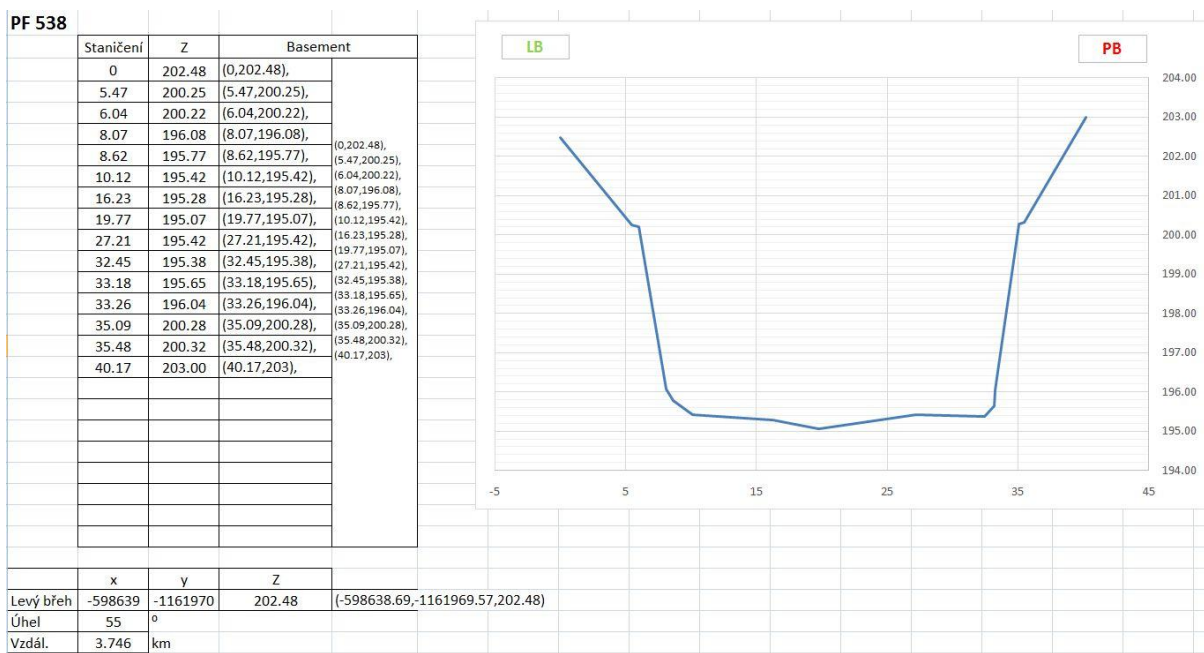
Hladina Q5 Svratka

Hladina Q1 Svratka

Obr. 3.1 Příklad příčných profilů z podkladu [3]

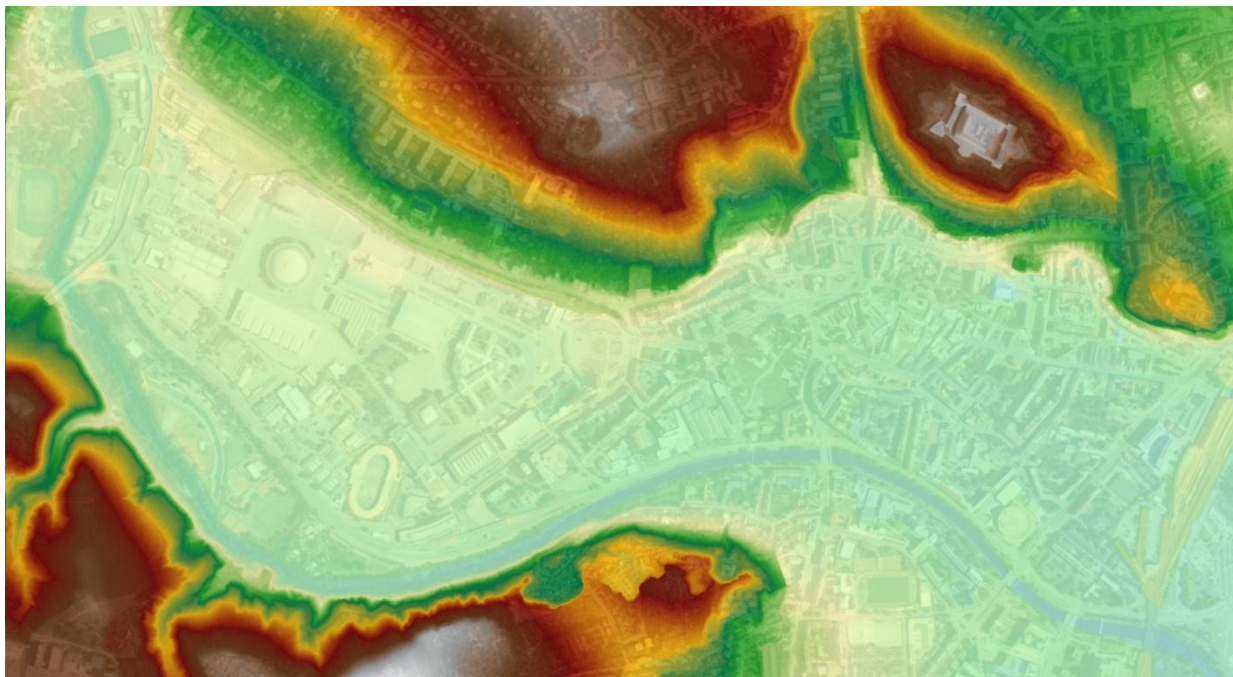


Obr. 3.2 Příklad situace území z podkladu [4]



### 3.4.2. Podklady pro 2D model

2D model vycházel z digitálního modelu reliéfu České Republiky 5. generace [7], jehož zdrojem byl Český úřad zeměměřičský a katastrální, ze kterého byla prostřednictvím ArcGIS serveru získána data pro vytvoření digitálního modelu terénu zájmové oblasti. Ta byla upravena do podoby georeferencovaného rastru formátu \*.TIF, se kterým je program QGIS schopen dále pracovat a vytvořit vstup pro výpočetní program BASEMENT.



Obr. 3.4 Příklad digitálního modelu terénu [7][9]

### 3.4.3. Podklady pro návrh PPO

Návrh protipovodňových opatření vycházel z Generelu odvodnění města Brna [1] vypracovaný v roce 2008. Z tohoto podkladu byly použity osy a typ liniových protipovodňových opatření.

### 3.4.4. Místní šetření

Dne 22. 6. 2015 byl autorem práce proveden terénní průzkum. V rámci tohoto průzkumu byla pořízena fotodokumentace vodního toku a technických objektů na toku. Fotodokumentace je přílohou této práce.

## 4. Nástroje řešení

K řešení této diplomové práce bylo využito následující programové vybavení:

- **BASEMENT** – realizace hydraulických výpočtů proudění vody
- **QGIS** – příprava dat pro hydraulické výpočty, zobrazení vypočtených výsledků
- **ArcGIS Desktop – ArcMap** – zpracování podkladů, vytvoření výkresové dokumentace.
- **Autodesk AutoCAD 2016** – zpracování podkladů, vytvoření výkresové dokumentace.
- **Microsoft Excel** – zpracování podkladů

### 4.1. BASEMENT

Hlavním nástrojem pro zpracování této práce byl numerický simulační software BASEMENT vyvinutý v Laboratoři hydrauliky, hydrologie a glaciologie (VAW) ve švýcarském federálním institutu technologie (ETH) v Curychu ve Švýcarsku. Tento software je volně šiřitelný a jeho licence je určena pro nekomerční použití. Program poskytuje nástroj pro numerické modelování proudění vody.

V programu BASEMENT lze počítat modely: - 1D

- 2D

- nebo spřažení 1D/2D

Dále lze v tomto programu simulovat jevy zahrnující transport sedimentů nebo šíření znečištění. V této práci byl využit spřažený 1D/2D model pro výpočet proudění vody ve vodním toku a v záplavovém území zájmové oblasti [A].

### 4.2. QGIS

Program QGIS (označovaný také jako Quantum GIS) je multiplatformní geografický informační systém (GIS). QGIS umožňuje zejména prohlížení, tvorbu a editaci rastrových a vektorových geodat, zpracování GPS dat a tvorbu mapových výstupů. Veškeré funkce jsou dostupné v uživatelsky přívětivém prostředí a program má velké množství zásuvných modulů. Je vyvíjen jako Open Source, což zaručuje dlouhodobou udržitelnost fungování vyvinutého pracovního postupu i jeho rozšiřitelnost. Tento software je volně šiřitelný a jeho licence je určena pro nekomerční použití. Program byl použit pro vytvoření výpočtové sítě 2D modelu pomocí zásuvného modulu BASEmesh a pro zobrazení vypočtených výsledků pomocí zásuvného modulu Crayfish. [B]



## 5. Popis zájmového území

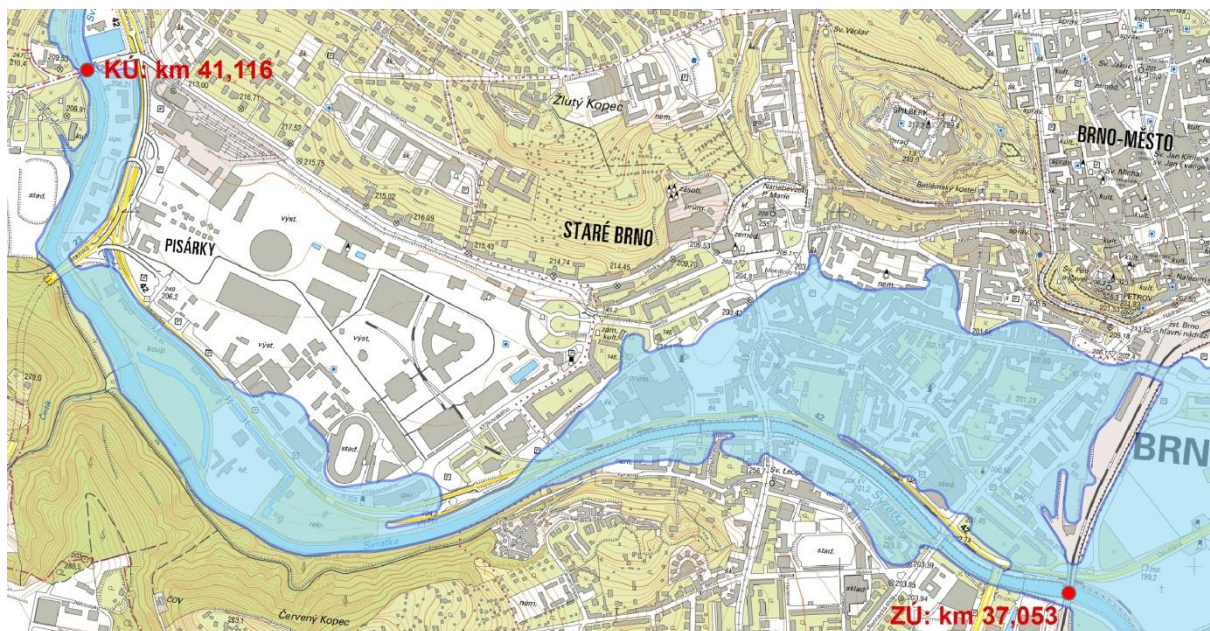
### 5.1. Vymezení a charakteristika zájmového území

Zájmové lokalita se nachází na území města Brna, jedná se především o obydlené oblasti po na obou březích toku řeky Svatky km 37,053 – 41,116 v městských částech Pisárky a Staré Brno. Zájmové území je ohraničeno Pisáreckým mostem v km 41,116 a železničním mostem na Štýřickém nábreží v km 37,053.

Na pravém břehu je řeka ohraničena svahek, (viz obr. 3.4) takže k výraznějším rozlivům zasahujících do obytné zástavby dochází jen mezi km 37,459 - 38,440. Na levém břehu dochází k rozlivům do zastavěného území prakticky v celé délce zájmového území, při čemž největší rozlivy zasahují obytnou zástavbu mezi km 37,053 - 38,660.

V zájmové oblasti bylo vyhlášeno záplavové území. (viz obr 5.1) Aktivní zóna záplavového území mimo koryto toku v zájmové lokalitě není vyhlášena. [11]

Koncept protipovodňové ochrany pro zájmovou lokalitu byl zpracován v Generelu odvodnění města Brna [1], ale z navržených opatření zatím byla realizována pouze protipovodňová železobetonová zídka kolem areálu Brněnských vodovodů a kanalizací a.s. mezi Pisáreckým silničním mostem a silničním mostem Okruh mezi km 41,106 – 40,510.



Obr. 5.1 - Situace řešené oblasti s vyznačením záplavového území pro Q100 [8][11]

## 5.2. Řeka Svratka

Svratka pramení na úbočí Křivého javoru (824 m n. m.) a Žákovy hory (809 m n. m.) ve Žďárských vrších. Druhý významný pramen vzniká u hájovny Blatky (někdy značen jako Břimovka). Teče pak zhruba jihojihovýchodním směrem, skrze Hornosvrateckou vrchovinu, kde je na ní vybudována soustava přehrad Vír I (km 114,9) a Vír II (km 111,6). Nad Tišnovem se do ní vlévá Loučka jako pravobřežní přítok a u Veverské Bítýšky přetíná Boskovickou brázdu. Následuje Brněnská přehrada (km 56,2) a kotlina města Brna. Zde Svratka mění směr na jižní a u Přízřenic se do ní na levém břehu vlévá jako její největší přítok Svitava. Pokračuje napřímeným korytem rovinou Dyjsko-svrateckého úvalu a v Židlochovicích se do ní vlévá Litava. Těsně před deltovým vyústěním do střední nádrže vodního díla Nové Mlýny na Dyji se Svratka stéká s Jihlavou, která je technicky vzato jejím největším přítokem, ale často se bere za rovnocenný přítok Dyje. Délka toku je 173,9 km, plocha povodí činí 7112,79 km<sup>2</sup>. Průměrný průtok v ústí (spolu s Jihlavou) činí 27,24 m<sup>3</sup>/s. Na Vysočině mezi Cikhájí a Jimramovem tvoří řeka nebo její břehy části historické zemské hranice Čech a Moravy, i když na řadě míst se zde zemská hranice od říčního koryta drobně odchyluje. Název Svratky pravděpodobně vychází ze staročeského slova „svortí“ – vinout se. V minulosti byla také, pod vlivem německého pojmenování, nazývána Švarcava. [7]

## 5.3. Hydrologické údaje

V zájmové lokalitě se nachází limnigrafická stanice Brno – Poříčí. Základní hydrologické údaje jsou uvedeny níže. Hodnoty m-denních a N-letých kulminačních průtoků jsou uvedeny v Tab. 5.1. Kvůli výstavbě jezu Riviéra byla historická vodoměrná stanice Brno – Pisárky posunuta níže po toku do místa dnešní stanice Brně – Poříčí, aby nedocházelo k ovlivnění měření postaveným jezem. Vybrané historické údaje o N-letých kulminačních průtocích na vodoměrné stanici Brno - Pisárky jsou uvedeny v Tab. 5.2 [14]. Data o výskytu těchto průtoků jsou uváděna pro dvě časová období. První období je do roku 1940 a druhé od roku 1941 po uvedení vodní nádrže Brno do provozu. Údaje z limnigrafické stanice budou použity pro kalibraci hydraulického modelu.

### 5.3.1. Stanice Brno - Poříčí

Tok:	Svratka
Kraj:	Jihomoravský kraj
Město:	Brno-střed
Provozovatel stanice:	ČHMÚ Brno
Staničení:	46,800 km

Plocha povodí:	1637,16 km <sup>2</sup>
Nula vodočtu:	197,10 m. n. m.
Číslo hydrologického pořadí:	4-15-01-153
Průměrný roční stav:	54 cm
Průměrný roční průtok:	7,76 m <sup>3</sup> /s
I. stupeň povodňové aktivity:	28,1 m <sup>3</sup> /s, 100 cm
II. stupeň povodňové aktivity:	66,3 m <sup>3</sup> /s, 160 cm
III. stupeň povodňové aktivity:	146 m <sup>3</sup> /s, 260 cm

**Tab. 5.1 – N-leté průtoky v profilu Brno - Poříčí [6]**

N-letost	1	5	10	50	100
Průtok [m <sup>3</sup> /s]	51,1	110	142	235	283

**Tab. 5.2 - Historické údaje o průtocích pro Brno – Pisárky dle [13]**

Rok	N-letost	5	10	20	50	100
Do 1940	Průtok [m <sup>3</sup> /s]	208	239	250	280	289
Od 1941		123	155	190	240	281

### 5.3.2. Povodí Moravy s.p.

Jako vstupní hydrologické údaje pro hydraulické výpočty budou použity průtoky z podkladu [2], viz Tab. 5.3.

**Tab. 5.3 – N-leté průtoky pro profil pod VD Brno [2]**

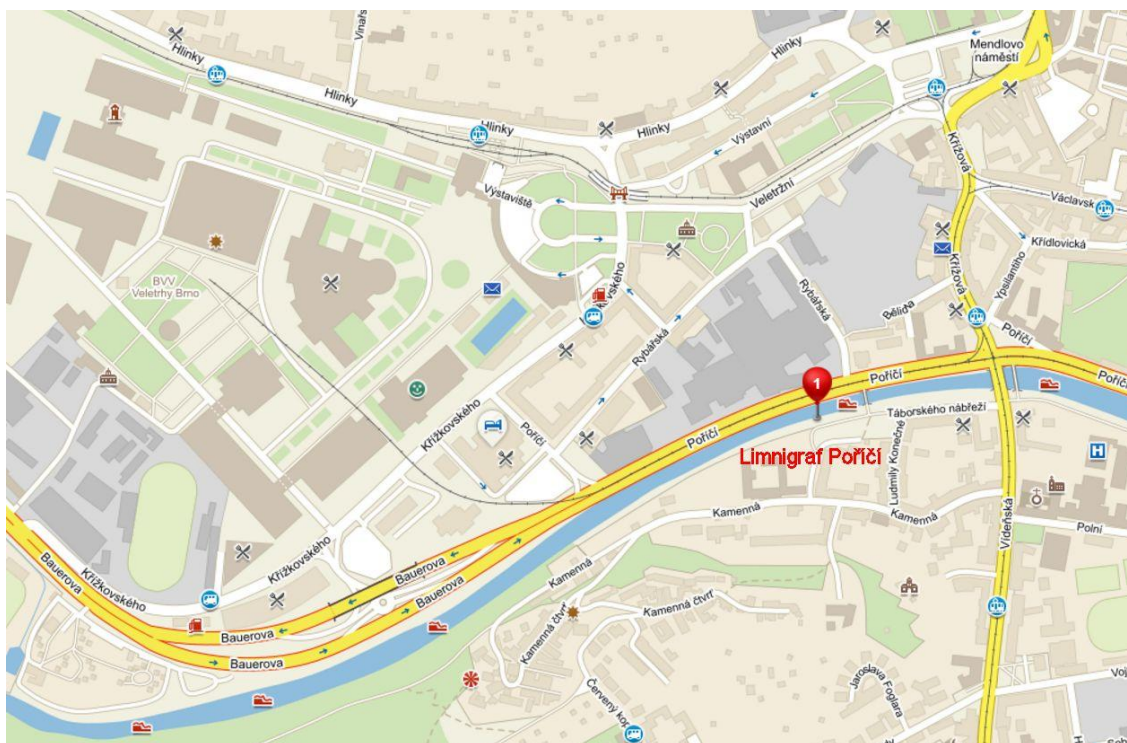
N-letost	1	5	20	100	100 Neovlivněný
Průtok [m <sup>3</sup> /s]	50,5	108,6	177,5	280	295



## 5.4. Objekty na vodním toku

### 5.4.1. Limnigrafická stanice Brno – Poříčí

Stanice se nachází na pravém břehu řeky Svatky v těsné blízkosti objektu kláštera řádu svaté Alžběty. Poloha stanice je zobrazena na Obr 5.2. Původní stanice byla v minulosti umístěna v Pisárkách na levé straně toku, ale postavením jezu pod Riviérou docházelo k nepravidelnému vzdutí, proto byla nakonec stanice přemístěna na Poříčí. Zde byl již v letech 1984 – 1989 v provozu rourový limnigraf. V roce 1989 postavilo Povodí Moravy zděnou vodoměrnou stanici na současném místě. Oba břehy nad i pod stanicí jsou upravené. Do výšky 2 m jsou břehy svislé a tvoří je kamenná opěrná zeď. Dno je také upravené, šterkovité až kamenité, místy jsou nánosy bahna. Větší průtoky se měří z lávky pro pěší, přibližně 100 m pod stanicí. Historie měření na této stanici sahají až do roku 1889. [14]



Obr. 5.2 - Poloha limnigrafické stanice Brno – Poříčí [14]

### 5.4.2. Jez Riviéra

Jez Riviéra se nachází na 39,855 km toku řeky Svatky. Je umístěný v lichoběžníkovém profilu. Délka přelivné hrany je 28 metrů. Původně se jednalo o vakový jez, který byl ale odstraněn a na místě zůstalo jen pevné těleso jezu z monolitického železobetonu.



**Obr 5.3 – Jez Riviéra km 39,855 [13]**

#### **5.4.3. Dnový práh km 38,251**

Na km 38,251 se nachází pevný dnový práh. Kóta přelivné hrany prahu je na 197,42 m n. m. Výška prahu je 60 cm. [2]

#### **5.4.4. Dnový práh km 37,428**

Na km 37,428 se nachází pevný dnový práh. Kóta přelivné hrany prahu je na 196,36 m n. m. Výška prahu je jeden metr. [2]

#### **5.4.5. Silniční most Pisárky**

Most se nachází na 41,116 km toku řeky Svratky, tedy na začátku zájmové lokality. Mostovka má šířku 21 metrů, má jedno pole, jehož průtočná šířka je 30 metrů a v horní části ji zužuje klenba mostu. Spodní hrana mostovky je v úrovni 207,9 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 208,77 m n. m. Most je kapacitní pro průtok  $Q_{100N}$ , při kterém je hladina na kótě 207.29 m n. m. [2]

#### **5.4.6. Silniční most Okruh**

Most se nachází na 40,524 km toku řeky Svratky. Tvoří ho dvě oddělené mostovky o šířce 16 metrů, přičemž každá má tři pole a pilíře umístěné na břehové hraně. Průtočná šířka hlavního pole v korytě toku je 44 metrů. Spodní hrana mostovky se pohybuje v úrovni mezi 208,1 – 212,3 m n. m. Horní hrana mostovky se pohybuje v úrovni mezi 208,72 – 213,37 m n. m. Most je kapacitní pro průtok  $Q_{100N}$ , při kterém je hladina na kótě 206.24 m. n. m. [2]

#### **5.4.7. Lávka pro pěší Riviéra**

Nachází se na 40,167 km toku řeky Svratky. Její šířka je tři metry, má tři pole a pilíře jsou umístěny na břehové hraně. Průtočná šířka hlavního pole v korytě toku je 33,7 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 205,41 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 207,03 m n. m. Lávka je kapacitní pro průtok  $Q_{100}$ , při kterém je hladina na kótě 204.91 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k zatopení spodní části mostovky, kóta hladiny je 205,88 m n. m. [2]

#### **5.4.8. Lávka pro pěší Poříčí**

Nachází se na 38,229 km toku řeky Svratky. Její šířka je čtyři metry, má jedno pole, jehož průtočná šířka je 25 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 201,3 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 202,68 m n. m. Lávka je kapacitní pro průtok  $Q_{20}$ , při kterém je hladina na kótě 200.79 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k přelévání mostovky, kóta hladiny je 202,91 m n. m. [2]

#### **5.4.9. Silniční most Vídeňská**

Most se nachází na 38,044 km toku řeky Svratky. Mostovka má šířku 21 metrů a tvoří ji jedno pole, jehož průtočná šířka je 25 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 201,4 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 203,56 m n. m. Je kapacitní pro průtok  $Q_{50}$ , při kterém je hladina na kótě 201.24 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k zatopení spodní části mostovky, kóta hladiny je 202,65 m n. m. [2]

#### **5.4.10. Lávka pro pěší Vídeňská**

Nachází se na 38,020 km toku řeky Svratky. Mostovka má šířku čtyři metry a tvoří ji jedno pole, jehož průtočná šířka je 25 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 201,4 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 203,56 m n. m. Je kapacitní pro průtok  $Q_{50}$ , při kterém je hladina na kótě 201.18 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k zatopení spodní části mostovky, kóta hladiny je 202,48 m n. m. [2]

#### **5.4.11. Silniční most Renneská**

Most se nachází na 37,447 km toku řeky Svratky. Mostovka má šířku 25 metrů a tvoří ji jedno pole, jehož průtočná šířka je 25 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 200,69 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 202,93 m n. m. Je kapacitní pro průtok  $Q_{50}$ , při kterém je hladina na kótě 200,38 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k zatopení spodní části mostovky, kóta hladiny je 201,6 m n. m. [2]

#### **5.4.12. Silniční most Heršpická**

Most se nachází na 37,271 km toku řeky Svratky. Mostovka má šířku 28 metrů a tvoří ji jedno pole, jehož průtočná šířka je 25 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 200,32 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 201,85 m n. m. Je kapacitní pro průtok  $Q_{50}$ , při kterém je hladina na kótě 200,14 m. n. m. Při průtoků  $Q_{100N}$  dochází k zatopení spodní části mostovky, kóta hladiny je 201,33 m n. m. [2]

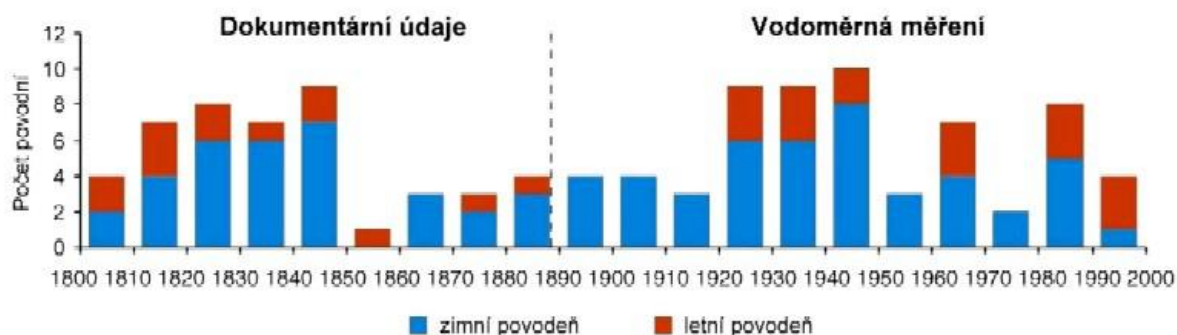
#### **5.4.13. Železniční most Poříčí**

Most se nachází na 37,043 km toku řeky Svratky, tvoří dolní okraj zájmové lokality. Mostovka má šířku 20, nad ulicí Poříčí se rozšiřuje až na 35 metrů. Tvoří ji 10 polí, ze kterých 5 zasahuje do koryta toku, jejich průtočná šířka je 9,2 metrů. Další 4 pole sloužící k silniční a železniční dopravě mají šířku 7,4 metrů. Poslední pole má šířku 24 metrů. Spodní hrana mostovky je v úrovni 203,45 m n. m. Horní hrana mostovky je v úrovni 207,05 m n. m. Most je kapacitní pro průtok  $Q_{100N}$ , při kterém je hladina na kótě 200,98 m. n. m. [2]

### **5.5. Historické povodně**

Město Brno je ohroženo povodněmi na řekách Svratce a Svitavě. Během historického vývoje města Brna byly povodněmi ohrožovány především jeho předměstí či další obce při obou řekách. První zmínka o historických povodních je doložena již k roku 1257. Od 16. Století postupně narůstá počet informací o povodních. Nejextrémnější povodně 20. století se vyskytly v Brně na přelomu srpna a září 1938 jako stoletá povodeň, další pak v lednu 1920, v březnu 1941 a v únoru 1946 jako padesátileté povodně. [13]





Počet významnějších povodní na Svatce a Svitavě v Brně pro jednotlivá desetiletí v období 1801–2000. Do roku 1887 jsou povodně určeny z dokumentárních pramenů (kroniky, noviny, hlášení Policejního ředitelství aj.) a od roku 1888 z měření vodoměrných stanic na Svatce a Svitavě v Brně a blízkém okolí. Jako zimní jsou označeny povodně s výskytem v listopadu–dubnu, jako letní v květnu–říjnu.

**Obr. 5.4 - Přehled významnějších povodní na Svatce a Svitavě v Brně [1]**

### 5.5.1. Povodeň v roce 1997

Většinu území povodí Moravy zasáhla v červenci roku 1997 povodeň. Příčinou byly vysoké srážkové úhrny během tří dnů, které přesáhly v některých místech hodnoty 80 mm. Na Brněnsku nedosáhla povodeň takové intenzity jako na jiném území. V tomto roce byla rekonstruována vodní nádrž Vír, která transformovala velkou část povodňové vlny. Do určité míry se projevil transformační účinek VD Brno. Vliv těchto vodních nádrží způsobil, že situace v Brně nebyla nijak dramatická. Kulminační průtok na stanici Brno – Poříčí byl 111 m<sup>3</sup>/s, což odpovídá přibližně průtoku Q<sub>5</sub>. [13]

### 5.5.2. Povodeň v roce 2006

Zimní období v roce 2006 mělo mimořádně dlouhé trvání a velkou mocnost sněhové pokrývky i v nižších polohách. V březnu přišlo výrazné oteplení doprovázené deštěm, které způsobilo rychlý vzestup průtoků v řece Svatce. Povodeň měla dvě kulminace, přičemž ta druhá překonala na stanici Brno – Poříčí průtok Q<sub>20</sub>, konkrétně to byla hodnota 186 m<sup>3</sup>/s. [13]

## 6. Popis navrhovaných protipovodňových opatření

Návrh protipovodňových opatření v zájmovém území respektuje koncepci dokumentu Generel odvodnění města Brna [1]. Dokument má několik dílčích částí, včetně části Vodní toky, jejíž součástí je i návrh protipovodňových opatření města Brna. Tato opatření mají chránit město před rozlivy za povodňových situací. Protipovodňová ochrana byla řešena v rámci generelu celkem na sedmnácti vodních tocích, pro tuto práci je stěžejní vodní tok Svratka.

### 6.1. Typy protipovodňových opatření

Technický návrh protipovodňových opatření na celém území města Brna zahrnuje tři základní typy opatření. Prvním typem jsou liniové stavby zabraňující rozlivům povodňových průtoků z toků. Mezi ně patří zemní hráze, železobetonové zdi a mobilní hrazení. Druhý typ je zkapacitnění nevhodných objektů na toku, jako jsou jezy, mosty, lávky. A třetí typ zahrnuje opatření na kanalizační síti, která zabraňují zpětným vzduťm z toku a vnitřními vodami. Práce se zabývá pouze liniovými protipovodňovými prvky, rozšíření berem nebo zkapacitnění objektů není v zájmové lokalitě uvažováno. Úroveň PPO pro Svratku je stanovena na návrhový průtok  $Q_{100N} = 395 \text{ m}^3/\text{s}$  s bezpečnostním převýšením 0,3 m nad tuto hladinu.

### 6.2. Pravý břeh

#### 6.2.1. Železobetonová zídka SO 1.1 - SO 1.4

Liniové železobetonové zdi jsou navrženy ve stísněných prostorových podmínkách, stávající i budoucí zástavby a v blízkosti komunikací. Niveleta ŽB zdi odpovídá kulminačnímu průtoku  $Q_{100N}$  s bezpečnostním převýšením 0,30 m. Založení zdi musí být provedeno s ohledem na geologické podmínky a výšku návrhové hladiny nad terénem při povodních. ŽB zeď je spojena s podzemním těsnícím prvkem (štěťová stěna), který snižuje množství průsaků v podloží. Vzdušná strana zdi je opatřena drenážním systémem. V některých místech dosahuje zídka výšky až přes 2 metry, v takových úsecích by z estetického hlediska mohla být vhodnější varianta složená z pevné a mobilní části. Základní charakteristiky ŽB zdí je uvedena následujících tabulkách.

**Tab. 6.1 Základní charakteristika SO 1.1**

Návrhová hladina	200,93 – 201,03 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	81,1 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,75 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.2 Základní charakteristika SO 1.2**

Návrhová hladina	202,08 – 202,91 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	548,5 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,4 m
Konstrukční řešení	Železobetonová

**Tab. 6.3 Základní charakteristika SO 1.3**

Návrhová hladina	203,01 – 203,34 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	169,2 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,0 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.4 Základní charakteristika SO 1.4**

Návrhová hladina	203,34 – 204,08 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	548,5 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,85 m
Konstrukční řešení	Železobeton

## 6.3. Levý břeh

### 6.3.1. Železobetonová zídka SO 2.1 - SO 2.6

Liniové železobetonové zdi jsou navrženy ve stísněných prostorových podmínkách, stávající i budoucí zástavby a v blízkosti komunikací. Niveleta ŽB zdi je navržena na hladinu  $Q_{100N}$  s bezpečnostním převýšením 0,30 m. Založení zdi musí být provedeno s ohledem na geologické podmínky a výšku návrhové hladiny nad terénem při povodních. ŽB zeď je spojena s podzemním těsnícím prvkem (štěťová stěna), který snižuje množství průsaků v podloží. Vzdušná strana zdi je opatřena drenážním systémem. V některých místech dosahuje zídka výšky až přes 2 metry, v takových úsecích by z estetického hlediska mohla být vhodnější varianta složená z pevné a mobilní části. Základní charakteristiky ŽB zdí je uvedena následujících tabulkách.

**Tab. 6.5 Základní charakteristika SO 2.1**

Návrhová hladina	200,93 – 201,21 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	187,7 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,33 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.6 Základní charakteristika SO 2.2**

Návrhová hladina	201,43 – 201,73 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	77,9 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	0,3 – 0,4 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.7 Základní charakteristika SO 2.3**

Návrhová hladina	202,08 – 202,91 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	518,8 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	0,57 m
Konstrukční řešení	Železobeton



**Tab. 6.8 Základní charakteristika SO 2.4**

Návrhová hladina	203,01 – 203,34 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	174,4 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,55 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.9 Základní charakteristika SO 2.5**

Návrhová hladina	203,34 – 204,61 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	1048,6 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	2,18 m
Konstrukční řešení	Železobeton

**Tab. 6.10 Základní charakteristika SO 2.6**

Návrhová hladina	202,08 – 202,91 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Celková délka zdi	567 m
Šířka zdi	0,4 m
Max. výška zdi	1,4 m
Konstrukční řešení	Železobeton

### 6.3.2. Ochranná sypaná hráz SO 3

Hráz se nachází na levém břehu řeky Svratky. Začátek staničení hráze se nachází přibližně v km 39,150 a konec v km 40,168 řeky Svratky. Hráz je odsazená od toku v rozmezí 53 - 189 m. Niveleta ochranné sypané hráze je navržena na hladinu  $Q_{100N}$  s bezpečnostním převýšením 0,30 m. Šířka koruny hráze je 3,50 m a celková délka hráze činí 718 m. Sklon svahu návodního líce je 1:2,5 a sklon vzdušného líce pak 1:2. Založení je pomocí zavazovacího ozubu. Podzemní těsnicí prvek bude navržen na základě geologického průzkumu. Z technického hlediska je řešená jako zemní sypaná homogenní hráz. Opevnění svahů je za pomoci travního porostu. Koruna hráze opatřena zpevněnou pojezdovou komunikací. Základní charakteristika hráze je uvedena v Tab. 6.11.

**Tab. 6.11 Základní charakteristika SO 3**

Návrhová hladina	204,61 – 205,53 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Minimální nadmořská výška hráze	204,91 m n. m.
Maximální nadmořská výška hráze	205,83 m n. m.
Celková délka hráze	718 m
Šířka v koruně hráze	3,5 m
Sklon svahu návodního líce	1:2,5
Sklon svahu vzdušného líce	1:2
Typ hráze	Homogenní zemní sypaná
Opevnění svahů	Zatravnění

**6.3.3. SO 4 – Mobilní hrazení**

Mobilní hrazení je navrženo v místech, kde z důvodů nutnosti zachování komunikačních tras v době mimo povodeň nemohou být trvalá PPO. Mobilní hrazení se nachází u lávky vedle silničního mostu na ulici Vídeňská. Spodní stavbu tvoří ŽB pas, který je opatřen podzemním těsnícím prvkem. Hloubka založení zabraňuje případnému průsaku v podloží a následnou ztrátu stability PPO. Konstrukce mobilního hrazení tvoří slupice, hrádla a stahovací zařízení. Slupice jsou z oceli svařované sloupky tvaru H, do kterých se zasouvají hrádla. Ve svislém směru mají profilové těsnění. Hrazení je vyrobeno ze slitiny hliníku a povrch je chráněn žárovým zinkováním. K pevným kotevním deskám se upevňují pomocí šroubů. Hradla jsou použita o šířce 90 mm. Výška ochrany je vždy násobkem výšky zvoleného typu hradla. Všechny trvale osazené díly jsou vyrobeny z kvalitní nerezové oceli. Základní charakteristika mobilního hrazení je uvedena v Tab. 6.12.

**Tab. 6.12 Základní charakteristika SO 4**

Návrhová hladina	203,34 m n. m.
Převýšení nad návrhovou hladinou	0,30 m
Hrazení v místě	Lávka pro pěší
Výška hrazení	0,96 m
Šířka hrazení	2 x 4 m

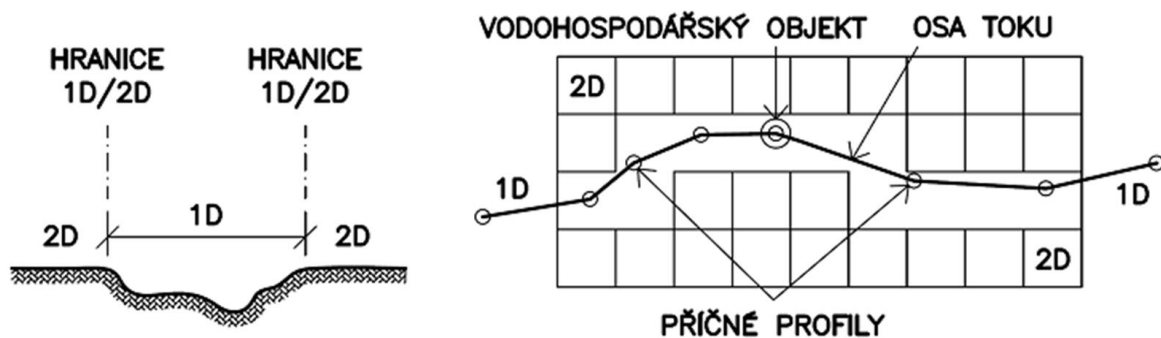
## 7. Popis koncepce hydraulických výpočtů

### 7.1. Cíle výpočtů

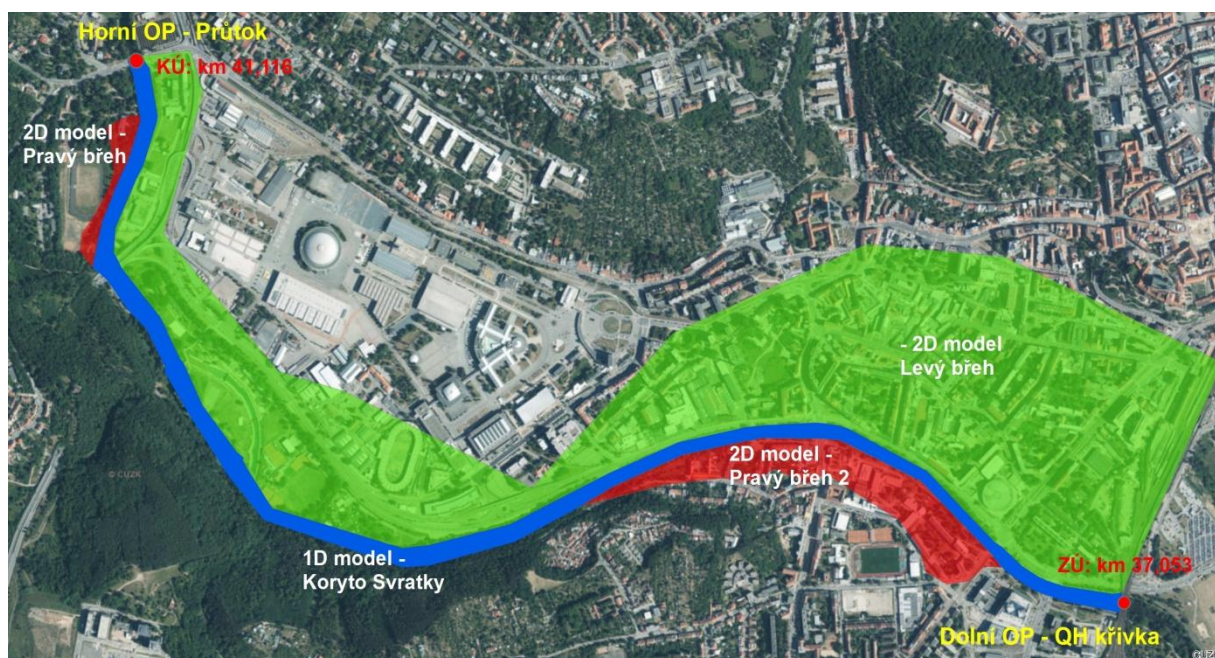
Cílem hydraulických výpočtů je posouzení stávajícího stavu povodňové ochrany vodního toku Svratky v řešené lokalitě (km 37,053 – 41,116 v městských částech Pisárky a Staré Brno) za použití spřaženého 1D/ 2D numerického modelu. Hydraulické výpočty budou provedeny pro zájmovou lokalitu bez protipovodňových opatření a následně budou posouzena návrhová protipovodňová opatření. První varianta bude provedena pro kulminační průtoky  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{100N}$ , druhá varianta bude provedena pouze pro  $Q_{100N}$ . Výsledky hydraulických výpočtů budou zpracovány do podoby map hloubek vody, rychlostí proudění vody a do map rozlivů jednotlivých kulminačních průtoků. (viz přílohy C) Průběhy hladin budou zakresleny do podélného profilu řeky Svratky. (viz přílohy B.3-5)

### 7.2. Koncepční model

Koncepční model je převedení reálného stavu zájmové lokality do modelového prostředí. Volba koncepčního modelu je závislá na kvalitě vstupních podkladů a požadavku přesnosti výstupních veličin. K simulaci proudění vody v zájmovém území byl využit software BASEMENT, vstupy do modelu a výstupy z něj jsou zpracovány pomocí programu QGIS s rozšířením o BASEmesh a Crayfish. Pro výběr vhodného modelu proudění bylo zohledněno několik požadavků. Zájmové území je vhodné řešit jako celek, na toku se nachází množství objektů a předpokladem pro výpočet je nerovnoměrné ustálené proudění (tzn. neznámé veličiny zahrnující hloubky vody a složky vektorů rychlosti proudění byly uvažovány nezávislé na čase). Transformace povodňové vlny inundací není ve stacionárním modelu zohledněna, což posunuje výsledky na stranu bezpečnosti. Vstupem pro sestavení modelu byl digitální model terénu [7] a geodetické zaměření příčných profilů koryta toku [3]. Pro účely této práce byl zvolen spřažený 1D/2D numerický model proudění. Záplavové území bylo řešeno pomocí 2D numerického modelu. V rozsáhlé a hustě zastavěné oblasti je 2D model vhodnější. Výpočet proudění v korytě toku byl realizován 1D numerickým modelem. Tento byl model zvolen, protože není k dispozici podrobnější zaměření. Podklady pro 1D numerický model koryta toku jsou tvořeny příčnými profily, které byly geodeticky zaměřeny s dostatečnou přesností. Numerické 1D a 2D modely jsou vzájemně propojeny v místech břehových hran. Obecná schematizace spřaženého 1D a 2D numerického modelu je zobrazena na obr. 6.1. Zvolená schematizace zájmové oblasti pro stávající stav je zobrazena na obr. 6.2.



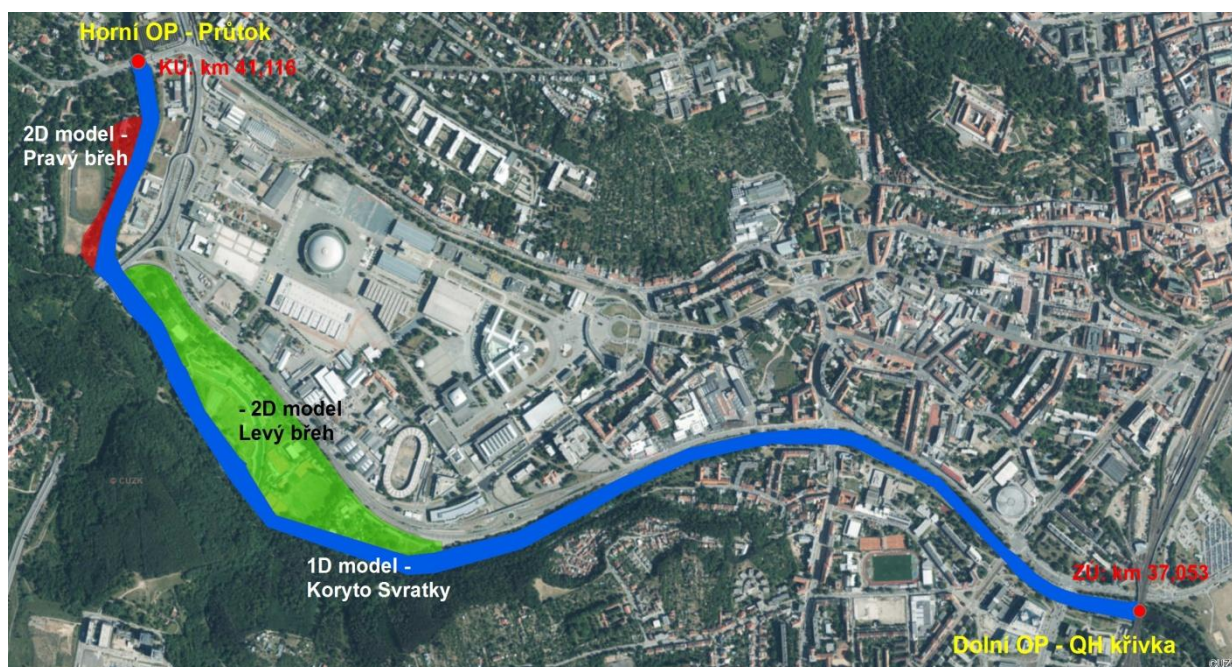
Obr. 7.1 - schematizace spřaženého 1D a 2D modelu



Obr. 7.2 Schematizace zájmové oblasti – stávající stav

Pro návrhový stav byla schematizace upravena. Koryto toku bylo opět řešeno 1D numerickým modelem, ale hranice 2D oblasti byly zmenšeny prvky návrhových protipovodňových opatření. Na levém břehu zůstala záplavová oblast pouze v okolí koupaliště Riviéra a na pravém břehu pouze oblast v okolí Anthroposu. Zvolená schematizace zájmové oblasti pro návrhový stav je zobrazena na obr. 6.3.





Obr. 7.3 Schematizace zájmové oblasti – návrhový stav

## 7.3. Matematický popis modelu

### 7.3.1. 1D model

Tento model je vhodný pro proudění v otevřených korytech, trubních sítích, propustcích, jezích a dalších objektech. Rychlost proudění zde lze nahradit průřezovou rychlostí a lze uvažovat stejnou výšku hladiny v celém příčném profilu. Model vychází z rovnice spojitosti a rovnice hybnosti s doplněním konstitutivními vztahy pro průtočnou plochu, průtok a sklon čáry energie.. [A]

Rovnice spojitosti:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7.1)$$

Rovnice hybnosti:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right) + \frac{Q}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} = g [J_D - J_E] \quad (7.2)$$

Průtočná plocha:

$$A = f(h) \quad (7.3)$$

Průtočné množství:

$$Q = A \cdot v \quad (7.4)$$

Sklon čáry energie:

$$J_E = \frac{v|v|}{C^2 \cdot R} \quad (7.5)$$

V těchto vztazích je:  $A$  průtočná plocha [ $m^2$ ],  $t$  čas [ $s$ ],  $Q$  průtok [ $m^3/s$ ],  $x$  vzdálenost ve směru osy  $x$  [ $m$ ],  $g$  gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ],  $J_D$  sklon dna [-],  $J_E$  sklon čáry energie [-],  $h$  hloubka vody v profilu [ $m$ ],  $v$  průřezová rychlost [ $m/s$ ],  $C$  Chézyho rychlostní součinitel [ $m^{0.5}/s$ ] a  $R$  hydraulický poloměr [ $m$ ].

Počátečními podmínkami jsou známé zadané funkce  $Q_0(x)$ ,  $h_0(x)$  v jednotlivých bodech výpočtové sítě v čase  $t_0 = 0$ :

$$Q(x_0, t_0) = Q_0(x) \quad (7.6)$$

$$h(x_0, t_0) = h_0(x) \quad (7.7)$$

Okrajové podmínky vyjadřují průběhy hledaných funkcí v krajních bodech:

$$Q(x_0, t) = Q_0'(t) \quad (7.8)$$

$$h(x_L, t) = h_L'(t) \quad (7.9)$$

Cílem je najít neznámé veličiny  $A$ ,  $Q$ ,  $v$ ,  $h$  a  $J_E$  splňující počáteční podmínky (7.6) a (6.7) a okrajové podmínky (7.8) a (7.9) a zároveň vyhovující rovnicím (7.1) až (7.5). [C][D]

Součástí 1D modelu je i řešení objektů na toku. Ve zvoleném programu lze nadefinovat pouze jezy. Pro výpočet přepadové množství v programu BASEMENT (6.10) je třeba stanovit přepadový součinitel  $\mu$  (7.12). V případě nedokonalého přepadu, je součinitel zatopení zohledněn v součiniteli  $\mu$ . [A]

$$Q = \frac{2}{3} b \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (7.10)$$

$$Q = b \cdot m \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (7.11)$$

$$\mu = \frac{2}{3} m \quad (7.12)$$

V těchto vztazích je  $Q$  průtok [ $m^3/s$ ],  $b$  šířka přelivné hrany [ $m$ ],  $h$  přepadová výška [ $m$ ],  $\mu$  jezový součinitel [-],  $m$  součinitel přepadu [-].[C]

### 7.3.2. 2D model

2D model je oproti 1D modelu výhodnější pro řešení proudění v širokých inundačních územích. Nevýhodou je však vyšší požadavek na množství a kvalitu vstupních dat a rovněž delší čas výpočtu. Toto proudění je popsáno rovnicí kontinuity, a pohybovými rovnicemi ve dvou směrech (x, y) doplněnými o turbulentní model dle Boussinesqa. [A]

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_y)}{\partial y} = 0 \quad (7.13)$$

Rovnice hybnosti ve směru x a ve směru y:

$$\frac{\partial(hv_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_xv_y)}{\partial y} - fhv_y = \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + \tau_{x,hlad} + T_{x,dno} \quad (7.14)$$

$$\frac{\partial(hv_y)}{\partial t} + \frac{\partial(hv_y^2)}{\partial y} + \frac{\partial(hv_xv_y)}{\partial x} - fhv_x = \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + T_{y,hlad} + T_{y,dno} \quad (7.15)$$

V uvedených vztazích (7.13) až (7.15) značí H polohu hladiny [m], t čas [s], h hloubka vody v profilu [m],  $v_x$  a  $v_y$  složky vektoru rychlosti ve směru osy x a y [m/s], x a y vzdálenost ve směru osy x a y [m], f Coriolisův parametr [-], T turbulentní smyková napětí [Pa],  $\tau$  smyková napětí na dně a na hladině [Pa] [C][D]

Počáteční podmínky jsou stanoveny jako známé průběhy funkcí  $v_{x0}(x,y)$ ,  $v_{y0}(x,y)$  a  $h_0(x,y,t)$  ve všech bodech náhradní oblasti  $\Omega$  v čase  $t_0 = 0$ :

$$v_x(x, y, t_0) = v_{x0}(x, y) \quad (7.16)$$

$$v_y(x, y, t_0) = v_{y0}(x, y) \quad (7.17)$$

$$h(x, y, t_0) = h_0(x, y) \quad (7.18)$$

Okrajovými podmínkami jsou průběhy funkcí na hranicích náhradní oblasti  $\Omega$ :

na horní hranici  $\Gamma_1$ :

$$v_x(x, y, t) = v_x(t)/\Gamma_1 \quad (7.19)$$

$$v_y(x, y, t) = v_y(t)/\Gamma_1 \quad (7.20)$$

na dolní hranici  $\Gamma_2$ :

$$h(x, y, t) = h(t)/\Gamma_2 \quad (7.21)$$

Cílem řešení je najít neznámé funkce  $v_x$ ,  $v_y$  a  $h$ , které splňují počáteční podmínky (7.16) až (7.18) a okrajové podmínky (7.19) až (7.21) a vyhovují rovnicím (7.13) až (7.15). [C][D]

## 7.4. Okrajové a počáteční podmínky

Zadání okrajových podmínek (OP) bylo provedeno na začátku a konci zájmového úseku řeky Svratky. Jako horní OP byly použity průtoky Q1, Q5, Q20, Q100 a Q100 neovlivněný, které vychází z podkladu [2]. Dolní OP tvoří měrná křivka profilu z podkladu [2]. Počáteční podmínky (PP) v korytě a záplavovém území byly pro výpočty zadány jako nulová hloubka a průtok (tzv. suché koryto). Pro výpočty vyšších průtoků bylo využito navázání na předchozí výsledky s nižšími hodnotami průtoků, což zvýšilo stabilitu a rychlost výpočtů. Postup hydraulických výpočtů je následující:

- Zpracování vstupních dat pro 1D a 2D numerické modely.
- Vytvoření modelů ze vstupních dat (1D model toku, výpočtová síť 2D modelu).
- Parametry modelu (OP, PP, počáteční čas, časový krok, drsnost atd.).
- Hydraulický výpočet 1D modelu.
- Kalibrace 1D model (drsnost, objekty na toku).
- Spřažení modelů 1D a 2D modelů (spojovací body mezi modely)
- Hydraulický výpočet 1D/2D modelu
- Kalibrace 1D/2D modelu (drsnost)
- Zpracování a vyhodnocení výsledků (hloubky a rychlosti vody)

## 7.5. Výpočtová síť

Program BASEMENT používá pro výpočet proudění vody v 2D oblasti trojúhelníkovou výpočtovou síť, tzv. mesh. Každý element výpočtové sítě může mít přiřazenou příslušnou drsnost, reprezentující povrch daného území. Pokud drsnost není elementu přiřazena ručně, přebírá element implicitně zadanou hodnotu drsnosti pro celý model.

## 7.6. Drsnosti koryta a záplavových území

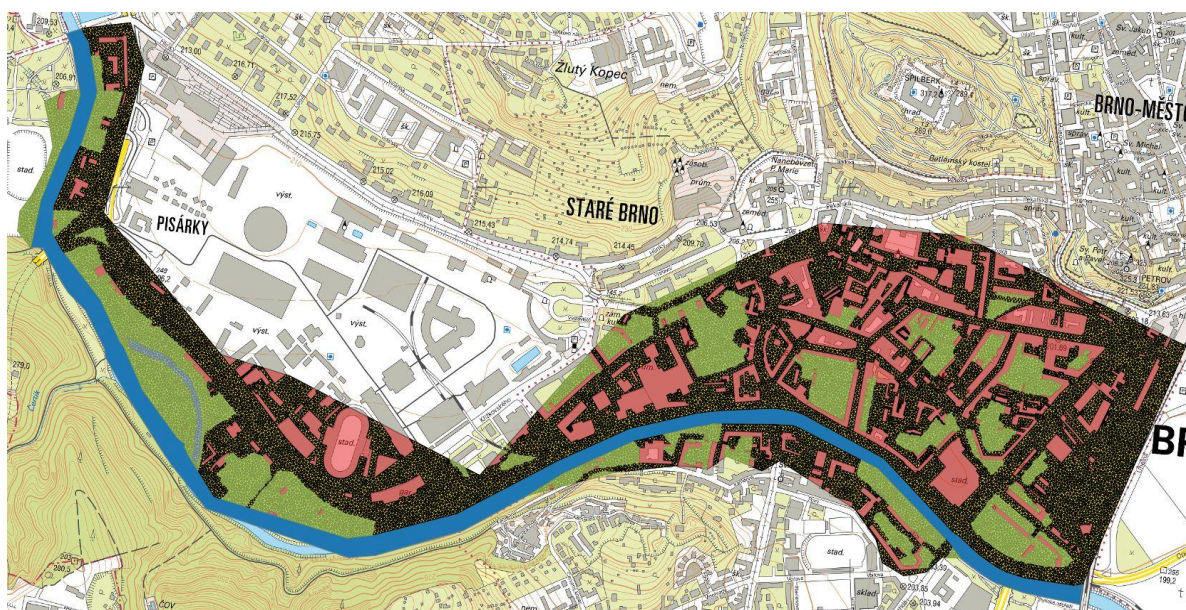
Údaje o drsnosti povrchu byly do modelu zadávány ve formě součinitele drsnosti dle Manninga. Výchozím podkladem pro odhad součinitelů drsnosti jednotlivých druhů povrchu byly především výsledky místních šetření a orotofotomapa. Hodnoty součinitelů drsnosti se dále upřesňovaly v průběhu kalibrace modelu. Hlavní koryto bylo specifikováno průměrnou hodnotou součinitele drsnosti, stanovenou po kalibraci modelu na  $n = 0,053$ . Drsnost



inundačního území se přiřazovala jednotlivým elementům výpočtové sítě na základě příslušných indexů, viz Tab. 7.1.

**Tab. 7.1 – Hodnoty drsností pro 2D oblast dle Manninga**

Typ povrchu	Drsnost dle Manninga	index
Zpevněné plochy	0,02	1
Travnaté plochy	0,05	2
Vodní hladina	0,01	3
Koryto	0.053	-



**Obr. 7.4 – Rozdělení drsností povrchů ve výpočtové síti**

## 7.7. Nejistoty vstupních dat

Protože model je zjednodušení skutečnosti, je vždy nutné počítat s určitou mírou nejistot, které do modelu vnášíme zjednodušenou geometrií toků, velikostí výpočtové buňky, hydrologickými údaji, a také součinitelem drsnosti. Následující nejistoty se vyskytují v tomto modelu.

### 7.7.1. Velikost buňky výpočetní sítě

Velikost buněk výpočtové sítě má zásadní vliv na kvalitu, ale i rychlost výpočtů, pokud by byla zvolená plocha buněk příliš malá, výpočty by trvaly velmi dlouho, pokud by byla moc velká, výsledky by byly méně přesné. Pro tento model byla maximální plocha buněk výpočtové sítě zvolena 50 m<sup>2</sup>.

### **7.7.2. Digitální model terénu**

Přesnost a podrobnost dostupného digitálního modelu terénu je zásadní v otázce nejistot o morfologii terénu. Limitující je jednak výšková přesnost, především ale nedostatečná hustota zaměření terénu. Úplná střední chyba výšky u modelu 5. generace je 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. [7] Dalším druhem nejistot související s morfologií terénu jsou možné změny koryta toku a inundačního území v závislosti na čase (možné zanášení koryta a objektů za povodňové situace apod.). Možné časové změny morfologie terénu nebyly v rámci hydraulických výpočtů uvažovány.

### **7.7.3. Součinitel drsnosti a přesnost hydrologických údajů**

Faktorem výrazně ovlivňujícím výsledky z numerického modelu je volba součinitelů drsnosti. V prvním kroku byly součinitelé drsnosti dle Manninga zadány podle obvyklých hodnot dostupných v odborné literatuře. Tyto hodnoty byly dále upřesňovány kalibrací modelu. Opět je třeba brát v úvahu možnost změny součinitelů drsnosti v čase, to ovšem v těchto výpočtech nebylo uvažováno.

### **7.7.4. Hydrologická data**

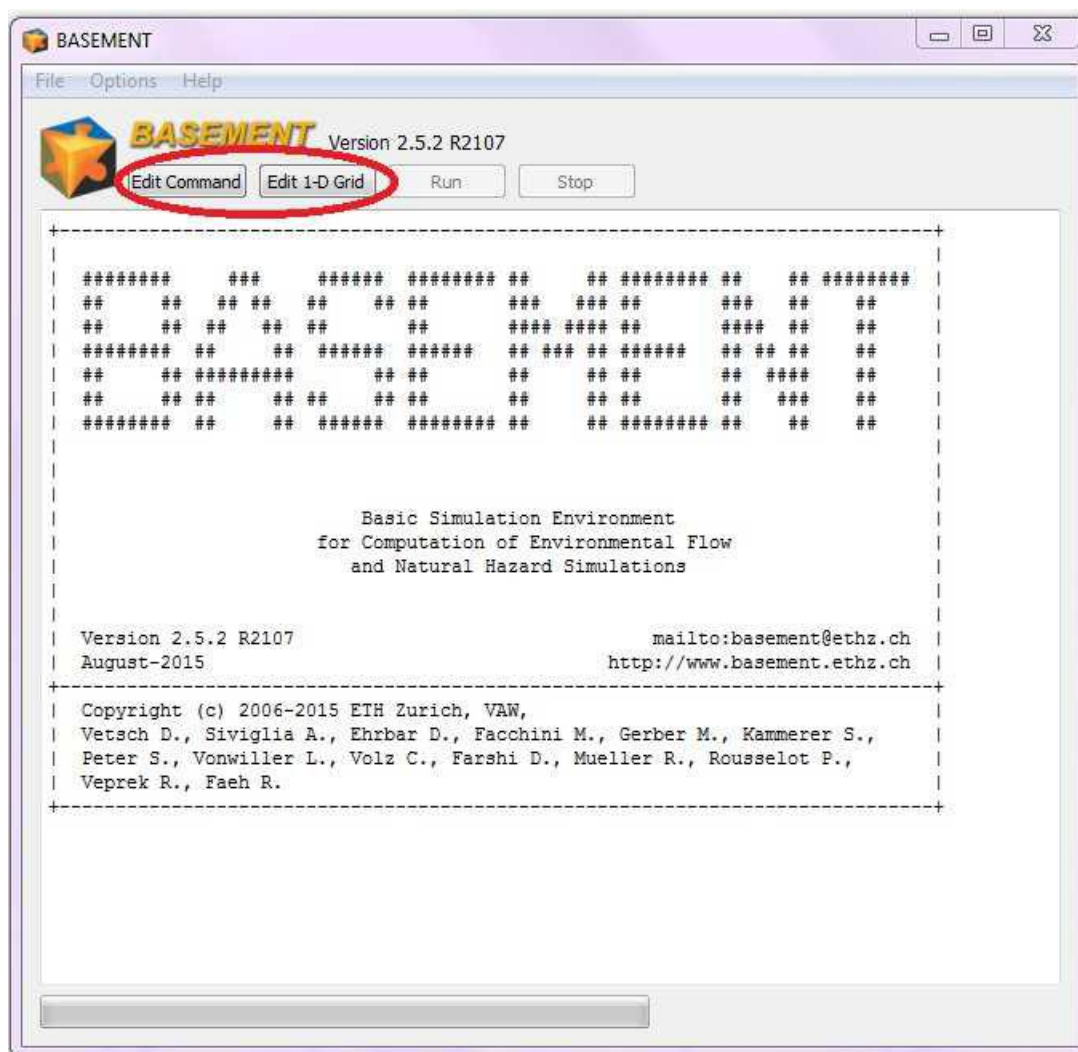
Nejistoty v hydrologických údajích závisí na třídě přesnosti dostupných podkladů. Informace o velikosti a průměrné době opakování kulminačních průtoků poskytuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) v souladu s ČSN 75 1400 ve formě N-letých průtoků. Údaje o průtocích jsou rozděleny dle spolehlivosti do čtyř tříd, kterým odpovídají příslušné hodnoty středních kvadratických chyb. Pro průtoky  $Q_1$  -  $Q_{10}$  je střední kvadratická chyba max. 40%, pro průtoky  $Q_{20}$  -  $Q_{100}$  je střední kvadratická chyba max. 60%.

## **7.8. Kalibrace modelu**

Kalibrací se rozumí zjištění a oprava hodnot vstupních parametrů nového numerického modelu ve snaze dosáhnout co možná nejlepší shody mezi výsledky výpočtů provedených kalibrovaným numerickým modelem a podklady. Kalibrace byla provedena pro polohu hladiny limnigrafu [5]. Jako vhodný průtok pro kalibraci zvolen  $128 \text{ m}^3/\text{s}$ , což odpovídá hladině při vyhlášení III stupně povodňové aktivity. Výsledkem kalibrace 1D modelu byla volba vhodné hodnoty součinitele drsnosti koryta toku a především správné nastavení parametrů objektů na toku. Tímto způsobem došlo ke kalibraci 1D modelu.

## 8. Postup hydraulických výpočtů

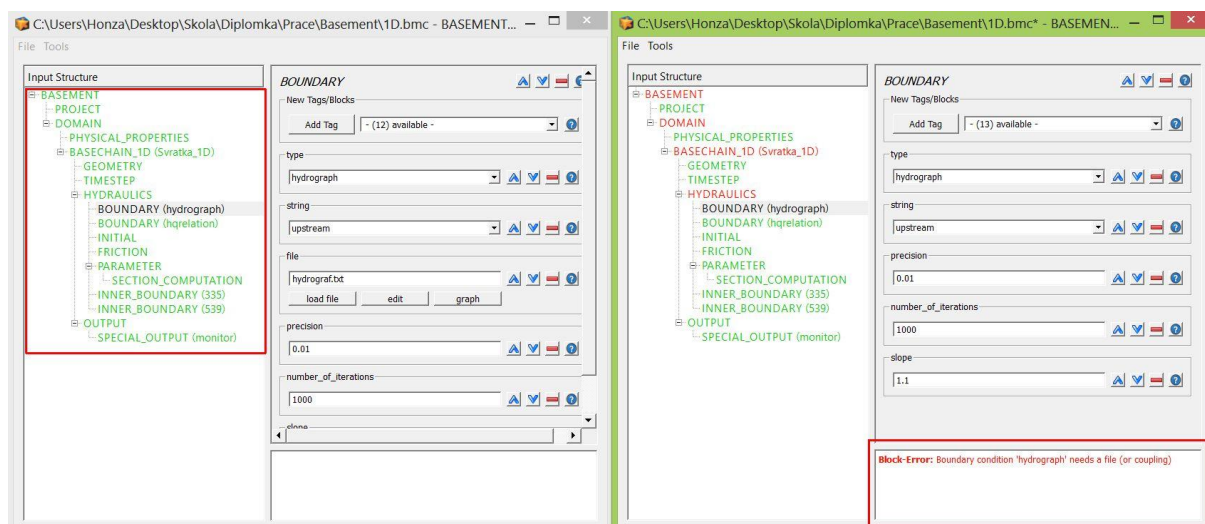
Jako prostředek pro řešení hydraulických výpočtů byl zvolen program BASEMENT. Je to volně šiřitelný numerický simulační software vyvinutý v laboratořích hydrauliky, hydrologie a glaciologie (geologická věda - studie ledovců) ve švýcarském federálním technologickém institutu v Curychu ve Švýcarsku. Cílem programu je poskytnout softwarový nástroj pro numerické modelování proudění vody. Slouží k výpočtům 1D, 2D, kombinovaného 1D/2D proudění a transportu sedimentů. Software je vyvíjen od roku 2006 a byl použit v mnoha vědeckých studiích, disertačních prací, a také např. v mezinárodním projektu Rhone-Thur. K vytvoření výpočtové sítě byly použity nástroje QGIS, konkrétně zásuvný modul BASEmesh a pro zobrazení výstupů z programu BASEMENT modul Crayfish.



Obr. 8.1 - Základní prostředí programu BASEMENT

Program BASEMENT umožňuje vytvoření dílčích sekcí (jak 1D, tak 2D), které mohou být pomocí okrajových podmínek spojeny do jednoho modelu. Každá z těchto sekcí má své vlastní okrajové podmínky a může obsahovat vlastní propojení k ostatním sekcím. Hlavní výhodou programu BASEMENT je schopnost pracovat s více procesorovými jádry, tzv. multithreading, což na moderních procesorových architekturách znamená několikanásobné zvýšení rychlosti výpočtu a stejně tak umožňuje zapojení více počítačů do jednoho výpočtu.

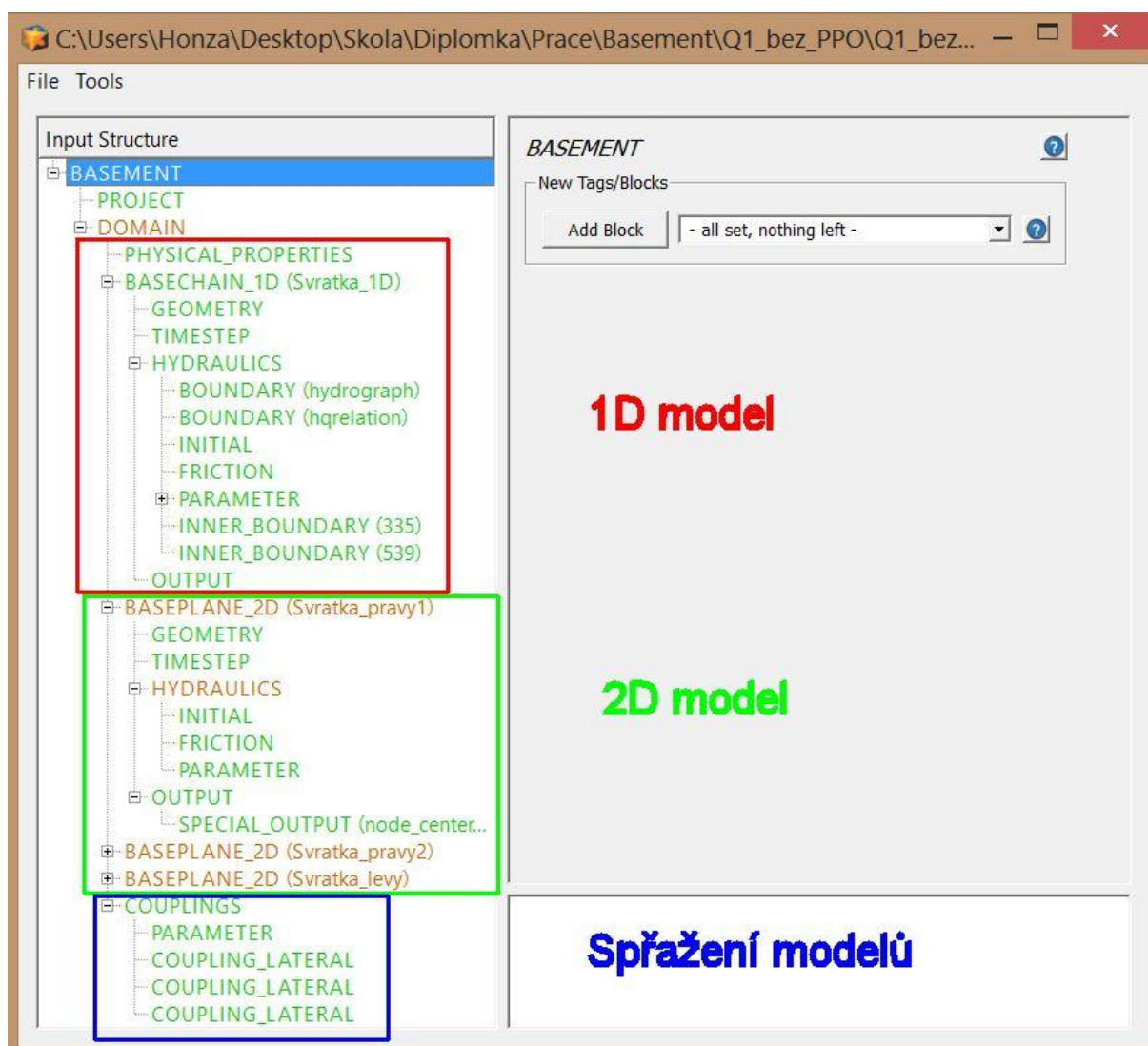
V uživatelském prostředí se vytvoří struktura „výpočtového stromu“ přidáváním jednotek „block“ a „tag“ (čímž je strukturován programovací kód) - viz obr. 8.2 vlevo. Tímto způsobem postupně zadáme všechny potřebné parametry ke spuštění programu. Součástí BASEMENT je automatický debugger (debug = ladit), který slouží jako průvodce nastavením projektu - pomáhá při vytvoření správné struktury „výpočtového stromu“ - viz obr. 8.2 vpravo.



**Obr. 8.2 - Prostředí programu BASEMENT**

Celý výpočtový model je nutné krok po kroku nadefinovat, jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, přidáváním „blocks“ a „tags“. Oba modely, 1D i 2D, byly nadefinovány zároveň. 2D model se navíc dělil do tří částí na pravý1, pravý2 a levý břeh. Po definování parametrů všech modelů bylo vytvořeno jejich spřažení. BASEMENT umožňuje párování více modelů v jednom výpočtu pomocí bloku Couplings. Postup řešení hydraulických výpočtů pro současný stav a stav s návrhem PPO je stejný, proto bude dále popisován jen postup pro stávající stav.





**Obr. 8.3 – Nadefinovaný spřažený 1D/2D numerický model**

Finální struktura numerického modelu vypadala následovně:

- Project - základní údaje o projektu, název, autor, datum,...
- Domain
  - Physical properties - fyzikální vlastnosti platné pro všechny výpočetní oblasti (viskozita, gravitační zrychlení apod.).
  - Basechain 1D (Svratka\_1D) - 1D model.
    - Geometry - nahrání souboru s morfologií 1D modelu s příponou \*.bmg.
    - Timestep - specifikace časových parametrů (celkový výpočetní čas, maximální časový krok, ...).
    - Hydraulics - stanovení okrajových a počátečních podmínek, vnitřních podmínek - jezů, drsností, apod.
    - Output - volba požadovaných výstupů, průběh hladin v jednotlivých profilech.

- Baseplane 2D (Svratka\_pravy1) - 2D model.
  - Geometry - nahrání souboru s morfologií 2D modelu s příponou \*.2dm.
  - Timestep - údaje časových kroků mohou i nemusí být shodné s 1D modelem.
  - Hydraulics - okrajové podmínky již zadány nebyly, pro 2D model se jimi stanou hranice napojení 1D modelu.
  - Output - volba požadovaných výstupů, průběh rychlostí a poloha hladiny ve formátu sms.
- Baseplane 2D (Svratka\_pravy2) - 2D model.
  - specifikace viz pravý břeh.
- Baseplane 2D (Svratka\_pravy2) - 2D model.
  - specifikace viz pravý břeh.
- Couplings
  - Coupling lateral - blok sloužící ke spřažení modelu 1D/2D.
- Parallel - nastavení počtu procesorových jader využívaných při simulaci (při zadání hodnoty 0, využije software maximální možný počet jader).

Před samotným nastavením numerického modelu, bylo potřeba vytvořit vstupní soubory obsahující informaci o morfologii terénu pro 1D a 2D model. Výsledkem byly soubory, které byly následně nahrány do programu BASEMENT - block Geometry.

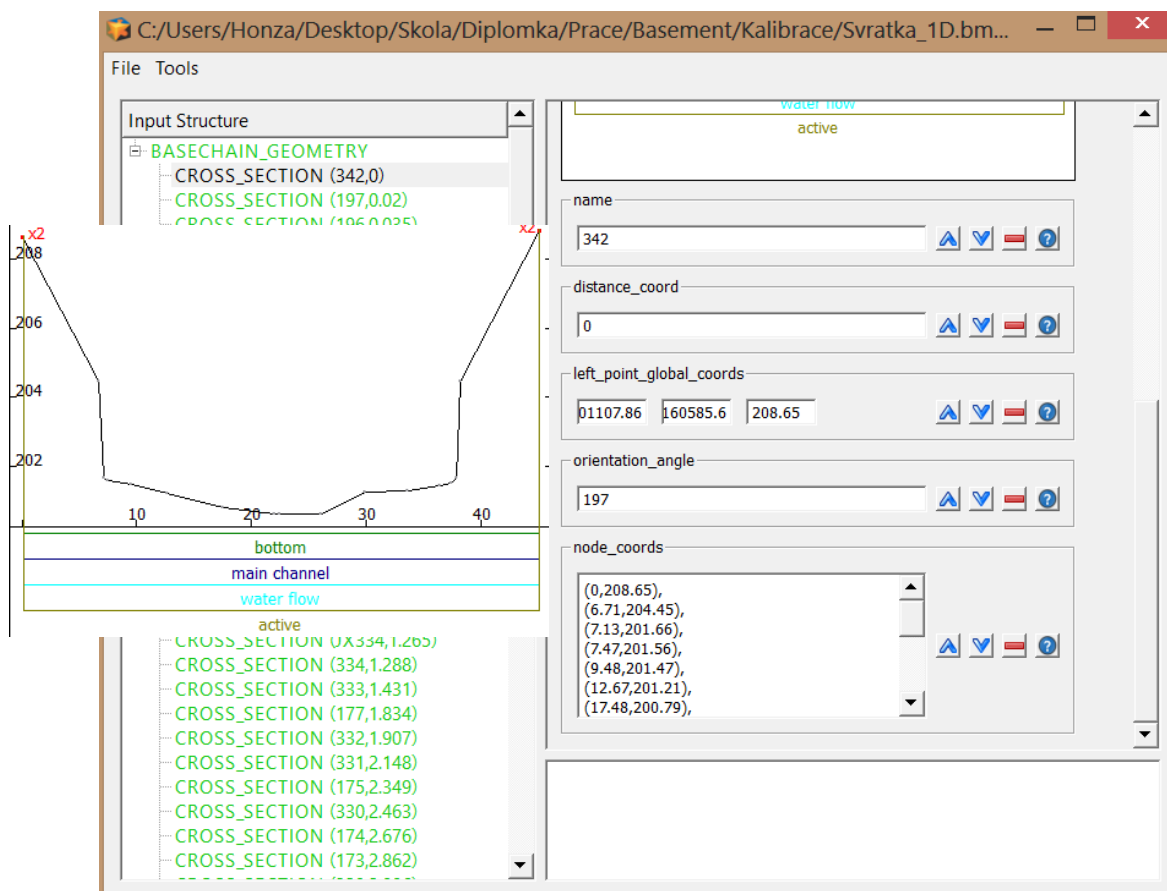
## 8.1. Geometrie 1D modelu

Hlavním podkladem pro vytvoření morfologie terénu 1D modelu byly geodeticky zaměřené příčné řezy toku [3]. Bylo potřeba vytvořit soubor geometrie s příponou \*.bmg, obsahující informace o umístění jednotlivých profilů, jejich geometrii, nadmořské výšce, staničení a úhlu natočení. Tento soubor byl nahrán do bloku geometrie v programu BASEMENT. Jednotlivé objekty na toku (mosty, lávky a jezy), byly řešeny přímo ve zvoleném softwaru. K dispozici bylo v řešeném úseku vodního toku celkem 47 profilů, včetně profilů jezů, mostů a lávek. Pro pozdější zadávání jezů bylo nezbytné vytvořit profily v nadjezí a podjezí co nejbližší k umístění samotného jezu. U jezu Riviéra byl znám příčný profil objektu a kóty dna koryta nad jezem i pod jezem. Toho bylo využito při tvorbě profilů určujícího umístění jezu. Mimo jezy se na toku vyskytují i lávky a mosty. V programu BASEMENT nelze zadat objekty typu lávek a mostů. Proto profily těchto objektů byly zadány bez úprav a po provedení kontrolního výpočtu byla dále řešena jejich kapacita. Příklad málo kapacitních lávek a mostů se dá řešit několika způsoby, např. zvýšením drsnosti v místě profilu nebo vytvořením pomyslného jezu, jehož úroveň by byla nastavena tak, aby kóta hladiny odpovídala úrovni hladiny při přelévání mostovky stanovené výpočtem.

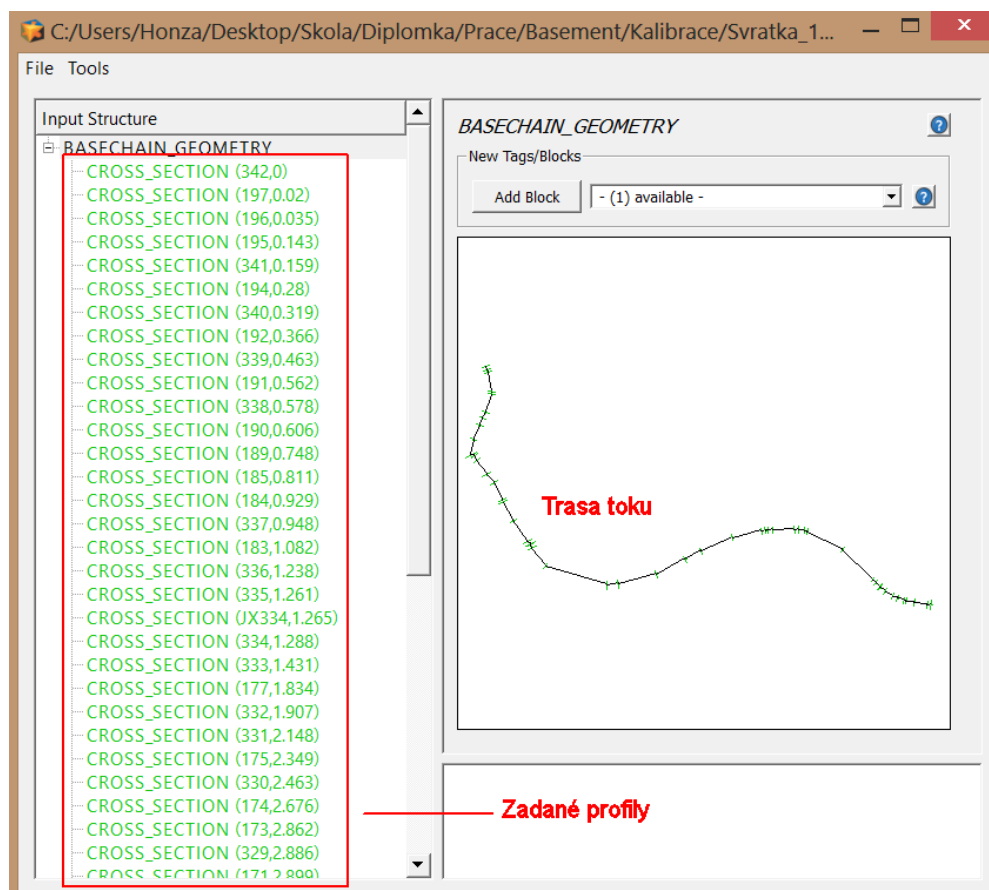
Samotné vytváření souboru \*.bmg umožňuje přímo program BASEMENT, po spuštění programu volbou *Edit 1-D Grid - Basechain geometry* lze nastavit geometrii pro výpočet 1D proudění, viz obr. 8.4. Zadávání dat je jednoduché, nicméně při velkém počtu profilů poměrně náročné. Každý profil se vytváří jednotlivě přidáváním bloku Cross section a nastavováním jednotlivých tagů. Program umožňuje i zobrazení zdrojového kódu volbou *Edit Raw*, který lze editovat přímo jako textový soubor, což dost usnadnilo práci při zadávání profilů, jelikož struktura každého profilu byla stejná, zkopírovala se a pouze se přepisovaly hodnoty. Konkrétně byly pro každý profil zadávány následující parametry (tags):

- Name – číslo profilů
- Distance\_coord - vzdálenost příslušného profilu od počátku (v km)
- Left\_point\_global\_coords - zadání souřadnic polohy levé břehové hrany - x, y, z
- Orientation\_angle - úhel ve stupních, udávající natočení profilu od horizontální roviny
- Node\_coords - souřadnice bodů (nadmořské výšky a staničení) definující příčný profil

Zadáváním profilů byla postupně vykreslena trasa řešeného úseku, čímž bylo možné ověřit správnost zadaných údajů, viz obr. 8.5.



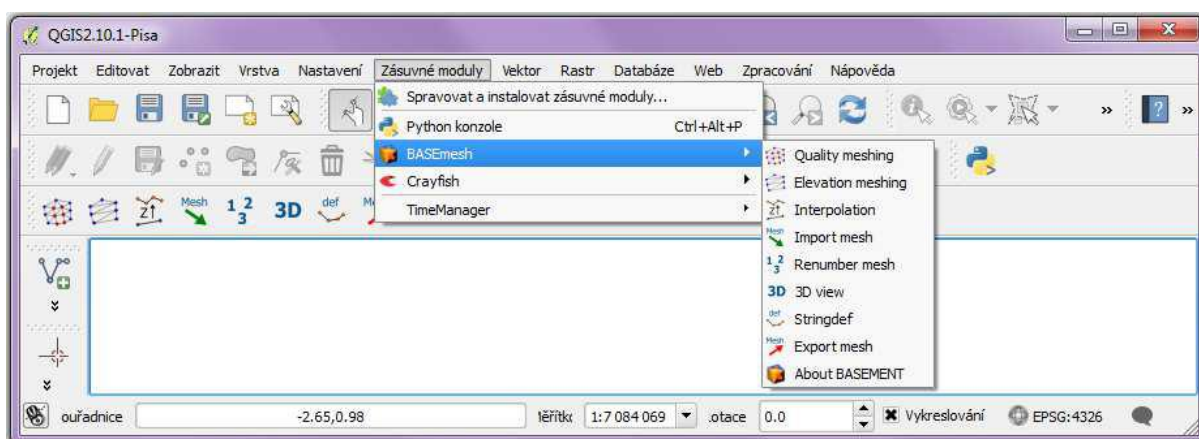
Obr. 8.4 – Parametry a vykreslení profilu



Obr. 8.5 - Zadaná geometrie 1D modelu

## 8.2. Geometrie 2D modelu

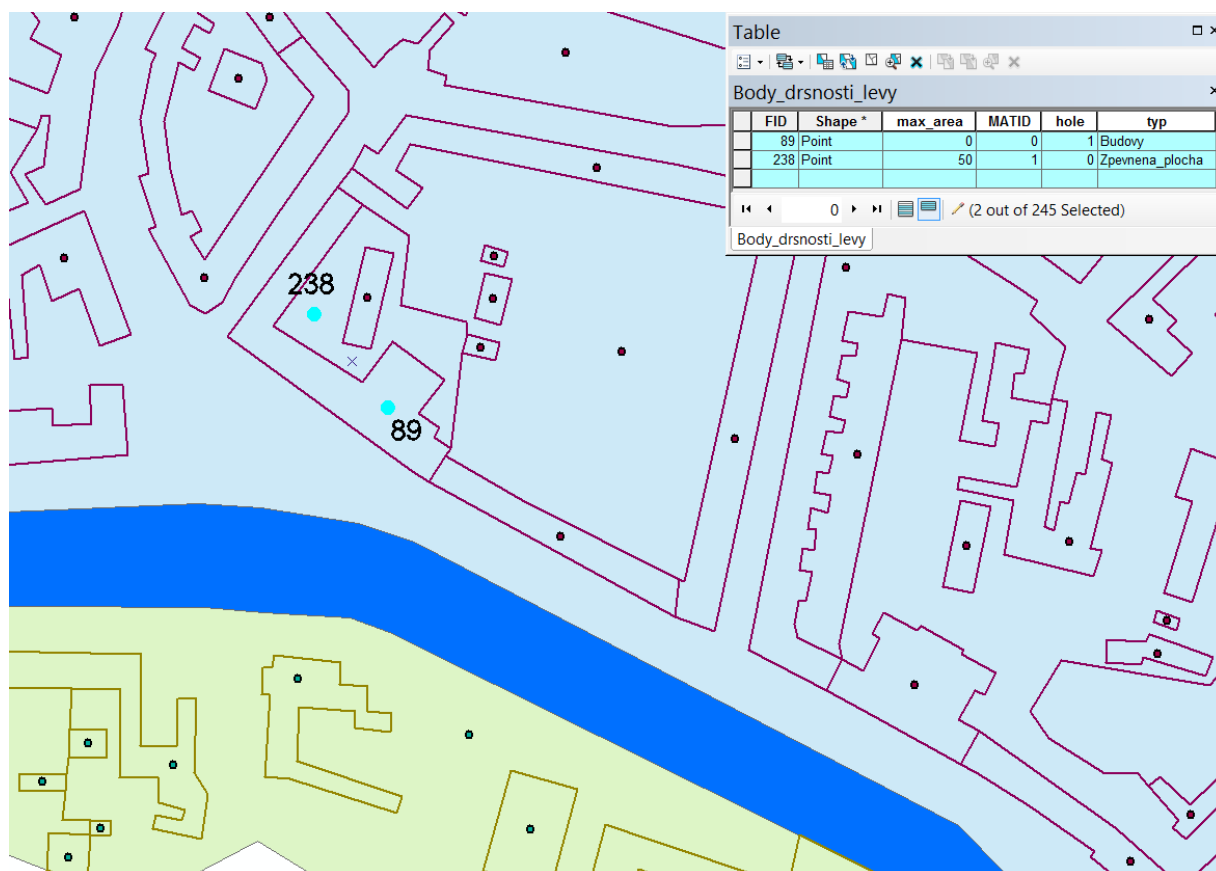
Pro zadání morfologie terénu 2D modelu byla využita data z digitálního modelu terénu. Jako vstup pro výpočet bylo potřeba vytvořit soubor s příponou \*.2dm obsahující v sobě informace o výškovém uspořádání jednotlivých bodů a rozložení elementů výpočtové sítě. Zmíněný \*.2dm soubor byl vytvořen v programu QGIS do něhož byl nainstalován zásuvný modul BASEmesh, viz obr. 8.6.



Obr. 8.6 - Zásuvný modul BASEmesh.

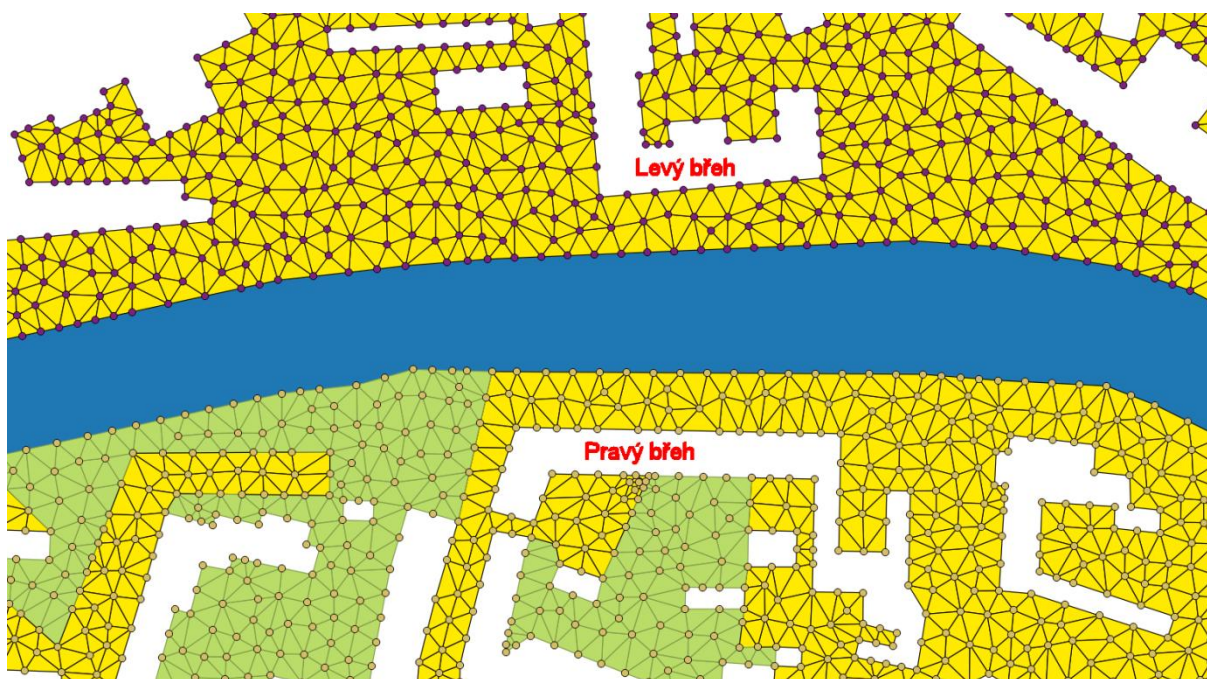


Nejdříve bylo nutné vytvořit ze zpracovaných podkladů trojúhelníkovou výpočtovou síť, tzv. Quality mesh. Vstupem pro Quality mesh byla vrstva hran, která rozdělovala území na zpevněné plochy, travnaté plochy, vodní hladinu a budovy. Dalším vstupem byla vrstva bodů, ve kterých byly indexy definovány vlastnosti jednotlivých ploch. Index MATID určuje, o jaký druh plochy se jedná. Index max\_area udával maximální plochu elementu výpočtové sítě, jeho velikost byla zvolena 50 m<sup>2</sup>. Budovy lze řešit dvěma způsoby. Prvním je zadání vysoké drsnosti polygonům představující hranice budov, další možnost bylo tyto polygony z výpočtové sítě vyjmout. Jelikož řešená oblast je hustě zastavěná, byla zvolena druhá možnost z důvodu snížení počtu elementů výpočtové sítě pro urychlení výpočtu. To se provedlo nastavením indexu hole na hodnotu 1.



**Obr. 8.7 - Vstup pro Quality mesh**

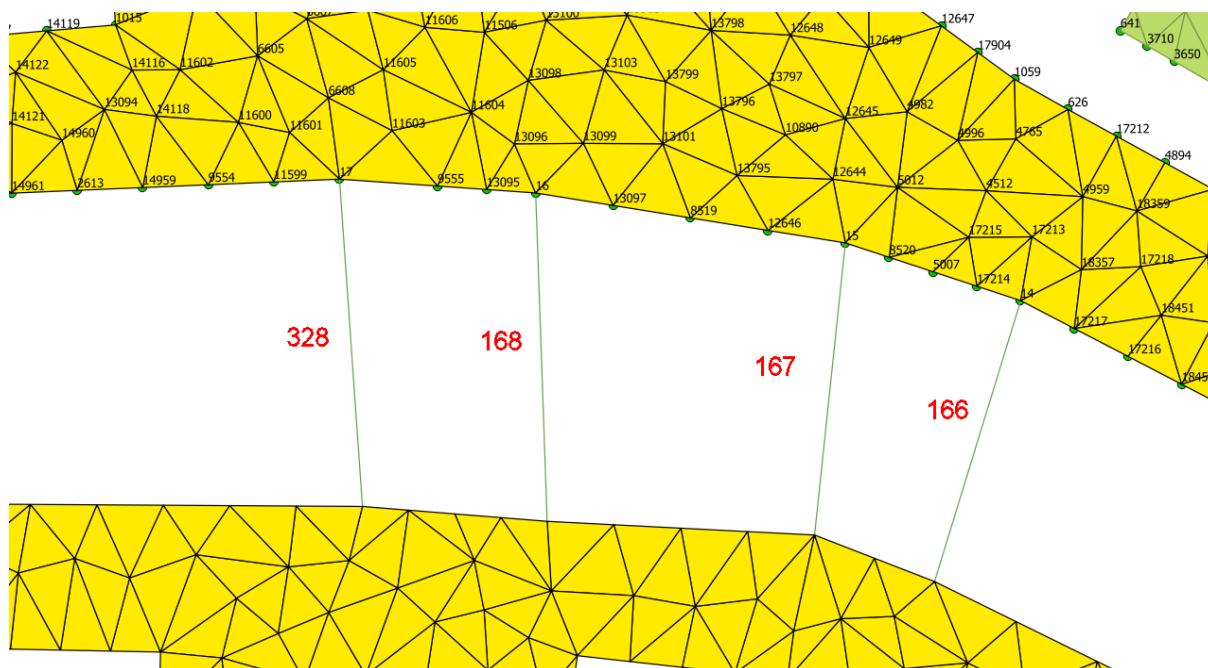
Výstupem v tomto kroku byly dvě vrstvy, a to Quality mesh a bodová vrstva spojující elementy sítě (Quality nodes), které zatím neobsahovaly informace o nadmořské výšce. Ty byly bodům přiřazeny přes příkaz interpolace z georeferencovaného rastru digitálního modelu terénu. [7] Výstupem interpolace byla jediná vrstva bodů se známými výškami. Z této vrstvy a z vrstvy elementů z Quality mesh byl proveden export souboru \*2dm. Při exportu souboru muselo být specifikováno, který sloupec atributové tabulky vrstvy elementů určuje indexy drsnosti (MATID), a který sloupec atributové tabulky vrstvy bodů určuje výškové souřadnice (Z).



Obr. 8.8 – Quality mesh a Quality nodes

### 8.3. Spřažení 1D/2Dmodelu

Ke spřažení modelů 1D a 2D bylo potřeba vytvořit spojovací soubor, který definuje jednotlivé spoje modelů. Tyto spoje jsou definovány názvem příčného profilu 1D modelu a odpovídajícími čísly uzlů připojeného 2D modelu. Každý element je připojen k jedinému příčnému profilu. Geometrické připojení musí být specifikováno v textovém dokumentu, který se načte na začátku simulace. Program BASEMENT umožňuje po spuštění simulace vytvoření připojovacího souboru automaticky. Tato funkce však nefunguje spolehlivě. Ve vygenerovaném souboru se vyskytlo mnoho chybných připojení na uzly, které se nenacházely na hranici 1D a 2D modelu, dokonce byly někdy propojeny i uzly na opačných březích řeky. BASEMENT bohužel neumí rozlišit, které hrany má připojit a které ne. Mimo vytvoření připojovacího souboru v textovém formátu, generuje program připojení i ve formátu \*.shp. Díky tomu se dalo snadno zkontrolovat správnost napojení. Nicméně jako rychlejší metoda vytvoření propojení modelů se osvědčilo manuální vytvoření propojovacího souboru od začátku. Do prvního sloupce se zapisovalo číslo profilu, na který se daná hrana vázala. Do druhého sloupce se zapisovala buď 0, pokud se jednalo o hranu na levém břehu, nebo 1, pokud se jednalo o body na břehu pravém. Ve třetím a čtvrtém sloupci byly zapsány čísla bodů, tvořících hranu elementu na hranici 1D/2D oblasti.



Obr. 8.9 – Propojování 1D a 2D modulů

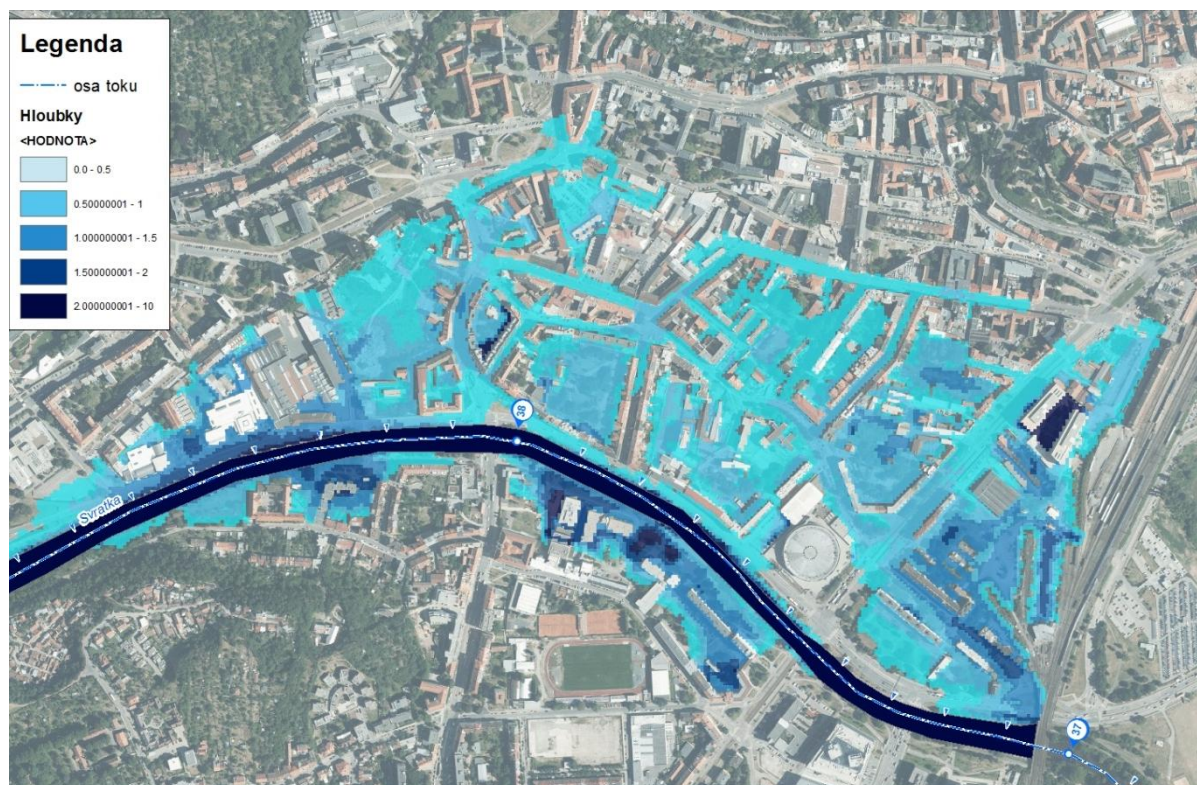
Levy_lateral_connections – Poz...				
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda
328	0	14120	14961	
328	0	14961	2613	
328	0	2613	14959	
328	0	14959	9554	
328	0	9554	11599	
328	0	11599	17	
328	0	17	9555	
168	0	9555	13095	
168	0	13095	16	
168	0	16	13097	
168	0	13097	8519	
167	0	8519	12646	
167	0	12646	15	
167	0	15	8520	
167	0	8520	5007	
166	0	5007	17214	
166	0	17214	14	
166	0	14	17217	
166	0	17217	17216	
166	0	17216	18452	
166	0	18452	2968	
166	0	2968	18495	
166	0	18495	18493	

Obr. 8.10. Propojovací soubor



## 8.4. Zobrazení výstupů

Výstupem z 1D modelu byl průběh hladiny v jednotlivých profilech, zapsaný v textovém souboru. Ty byly zakresleny do podélného profilu toku pro všechny řešené kulminační průtoky. Výstupem 2D modelu byly průběh hladiny a rychlosti proudění vody v inundačním území, uložené v souboru s příponou \*.sol. Pro zobrazení výstupů z 2D modelu byl využit zásuvný modul softwaru QGIS - Crayfish, z něhož se dále hodnoty exportovaly do rastrové podoby, se kterou se dále pracovalo v programu ArcMap.



Obr. 8.11 – Výsledky hydraulických výpočtů – mapa hloubek

## 9. Zhodnocení výsledků výpočtů

Výsledky numerických výpočtů zahrnovaly především údaje o hloubkách a rychlostech vody v zájmovém území. Výstupy byly zpracovány do podoby map hloubek, rychlostí a rozlivu. Průběhy hladin z 1D modelu byly zakresleny do podélného profilu toku řeky Svratky. Při řešení stávajícího stavu byly použity kulminační průtoky  $Q_1$ ,  $Q_5$ ,  $Q_{20}$ ,  $Q_{100}$  a  $Q_{100N}$ . V rámci posouzení návrhu PPO bylo počítáno s kulminačními průtoky  $Q_{100N}$ .

### 9.1. Stávající stav

#### 9.1.1. Průtok $Q_1$

Při jednoletém průtoku  $50,5 \text{ m}^3/\text{s}$  nedochází k vybřežení toku řeky Svratky, protože koryto je kapacitní do průtoku  $Q_{20}$ . Vypočítané hodnoty rozlivů odpovídají dostupným hodnotám rozlivů dle [11]

#### 9.1.1. Průtok $Q_5$

Při pětiletém průtoku  $108,6 \text{ m}^3/\text{s}$  nedochází k vybřežení toku řeky Svratky, protože koryto je kapacitní do průtoku  $Q_{20}$ . Vypočítané hodnoty rozlivů odpovídají dostupným hodnotám rozlivů dle [11]

#### 9.1.2. Průtok $Q_{20}$

Při dvacetiletém průtoku  $177,5 \text{ m}^3/\text{s}$  dochází k lokálnímu vybřežení toku řeky Svratky v místě soutoku s Kohoutovickým potokem v km 40.786. K dalšímu lokálnímu vybřežení dochází mezi km 40,580 – 40. 620. K tomuto rozlivu by dle podkladů [11] v daném místě nemělo docházet, může to být způsobeno nepřesným určením levé břehové hrany, jelikož je v tomto místě břeh pokryt vzrostlými stromy. V oblastech vypočítaného rozlivu se nachází pouze travnaté plochy porostlé stromy, takže nevznikají škody. Výsledky tohoto scénáře byly zpracovány v podkladech C.1.1. a C.2.1.

#### 9.1.3. Průtok $Q_{100}$

Při stoletém průtoku  $280 \text{ m}^3/\text{s}$  dochází na pravém břehu k vybřežení toku řeky Svratky v okolí soutoku s Kohoutovickým potokem cca mezi km 40.786 – 40,920. K dalšímu lokálnímu vybřežení dochází cca mezi km 40,580 – 40. 620. Cca mezi km 38,200 – 38,560 dochází k rozlivům, které zasahují do obytné zástavby. K dalším rozlivům zasahujícím do obytné zástavby dochází cca mezi km 37,485 – 37,975.. Na levém břehu dochází k vybřežení u železničního mostu cca mezi km 37,063 – 37,170 voda proudí ulicí Křídlovická až k Novým sadům a zaplavuje poměrně velké území zastavěné území. K dalším rozlivům

dochází cca mezi km 38,100 – 38,810. Rozliv dosahuje téměř až k ulici Rybářská a přes Bělidla se voda dostává na ulici Křížová až po křižovatku s ulicí Václavská. I zde je zasažena rozsáhlá oblast obytné zástavby. K dalšímu vybřežení dochází cca mezi km 39,125 – 40,480, zde dochází k zaplavení koupaliště Riviéra a přilehlých rekreačních ploch včetně hřiště a několika rekreačních budov. Hloubka vody se pohybuje většinou v rozmezí 0,5 – 1 m, místy ale dosahuje téměř 2 metrů. Při tomto průtoku vznikají škody na majetku. Pro porovnání rozlivů s podklady chybí dostupné materiály. Výsledky tohoto scénáře byly zpracovány v podkladech C.1.2. a C.2.2.

#### **9.1.4. Průtok $Q_{100N}$**

Při stoletém neovlivněném průtoku  $395 \text{ m}^3/\text{s}$  dochází na levém břehu k rozlivům podél téměř celé délky toku kromě úseku mezi km 37,215 – 37,560, zde vzniká nezaplavený pás na ulici Poříčí, nicméně do ulice Nové sady voda natéká z obou stran. Rozliv dosahuje až k ulici Hybešova. Dále zasahuje až na Mendelovo náměstí a postupuje dál podél ulice Veletržní k ulici Rybářská, podél které postupuje k ulici Bauerova dál kolem výstaviště až k Pisáreckému mostu. V zaplaveném území se nachází velké množství budov. Na pravém břehu se rozlévá cca mezi km 37,470 – 38,015, rozliv zde dosahuje téměř až k ulici Polní a zasahuje obytnou zástavbu. Dále vybřežuje cca mezi km 38,100 – 38,695, kde je zaplaveno Tábořského nábreží a po ulici Ludmily Konečné se rozliv dostává k ulici Kamenná. I zde rozliv zasahuje do obytné zástavby. K dalším rozlivům dochází cca mezi km 40,555 – 40,965, v tomto úseku se nenachází žádné budovy. Hloubka vody se pohybuje většinou v rozmezí 0,5 – 1,5 m, místy ale přesahuje i 2 metry. Vypočítané hodnoty rozlivů jsou místy o něco menší než v dostupných hodnotách rozlivů dle [11]. Při tomto průtoku vznikají značné škody na majetku. Výsledky tohoto scénáře byly zpracovány v podkladech C.1.3. a C.2.3.

## **9.2. Návrhový stav**

#### **9.2.1. Průtok $Q_{100N}$**

Při stoletém neovlivněném průtoku  $395 \text{ m}^3/\text{s}$  dochází na levém břehu k rozlivům cca mezi km 39,185 – 40,505. Zde dochází k zaplavení koupaliště Riviéra a přilehlých rekreačních ploch včetně hřiště a několika rekreačních budov. Na pravém břehu dochází k vybřežení cca mezi km 40,555 – 40,965, v tomto úseku se nenachází žádné budovy. Hloubka vody se pohybuje většinou v rozmezí 0,5 – 1,5 m, místy ale přesahuje i 2 metry. Vznikají menší škody na majetku. Výsledky tohoto scénáře byly zpracovány v podkladech C.1.4. a C.2.4.

## 10. Celkové hodnocení a závěr

Cílem této práce bylo posouzení současného stavu zájmové lokality pro dané povodňové scénáře s následným návrhem protipovodňových opatření, zmírňujících následky povodně a jejich posouzení. Byly provedeny hydraulické výpočty proudění vody s využitím spřaženého 1D/2D numerického modelu v softwaru BASEMENT. V první variantě se posuzoval současný stav povodňové ochrany. V území je vyhlášeno záplavové území pro oblasti s potenciálně významným povodňovým rizikem. Hydraulické výpočty potvrdily nejrizikovější lokality, kde rozliv přímo ohrožuje zastavěnou oblast. Stanovené rozlivy pro všechny uvažované kulminační průtoky s drobnými odchylkami poměrně uspokojivě kopírovaly vyhlášené záplavové území.

Cílem druhé varianty byl návrh vhodných protipovodňových opatření s příslušnou bezpečnostní rezervou nad  $Q_{100N}$ . Numerický model vytvořený pro stávající stav byl dle potřeb modifikován, a byl znovu použit k hydraulickým výpočtům pro stav s PPO. Účelem návrhu opatření bylo omezit rozliv při povodňových průtocích do oblastí s obytnou zástavbou. Posouzením výsledků hydraulických výpočtů bylo zjištěno, že cíl byl splněn. Návrhem PPO nedošlo k ohrožení dalších objektů, došlo k omezení rozlivů do nejohroženějších částí zájmové lokality, kde potenciálně vznikaly největší škody.

Přesnost výpočtů byla ovlivněna nedostatečně kvalitními vstupními daty. Pro zvýšení přesnosti by především bylo potřeba detailní zaměření břehové hrany pomocí GPS lokátoru a doplnění zaměření příčných řezů korytem v místech, kde chybí nebo jsou profily příliš daleko od sebe. Poté by bylo nutné provést znovu hydraulické výpočty a kalibraci modelu.

Lze však jednoznačně říci, že navrhovaná opatření zlepší stav protipovodňové ochrany města Brna především v městské části Staré Brno. Navržená opatření zabrání nežádoucím rozlivům a poskytují bezpečnostní rezervu 30 cm nad uvažovaným návrhovým průtokem. V některých místech, kde protipovodňová zeď dosahuje výšek přes 2 metry, by bylo vhodné zvážit jako alternativu realizaci kombinace pevné zdi a mobilního hrazení. Vzhledem k umístění lokality v centru Brna také rovněž doporučuji následnou spolupráci s architektem, resp. zpracování návrhu architektonického řešení PPO.

Důležité je také zmínit, že veškeré zde navržené opatření jsou součástí soustavy opatření na řece Svatce v městě Brně, která spolu vzájemně souvisí. V této práci se ale zájmová lokalita řešila izolovaně. Pro zvýšení přesnosti výpočtů a zlepšení celkové ochrany města Brna před povodněmi je proto zapotřebí řešit tyto ochranné prvky jako celou soustavu protipovodňových opatření.

## 11. Seznam Obrázků

Obr. 3.1 Příklad příčných profilů z podkladu [3]

Obr. 3.2 Příklad situace území z podkladu [4]

Obr. 3.3 Příklad dat o příčném profilu zapsaných do Excelu

Obr. 3.4 Příklad digitálního modelu terénu [7][9]

Obr. 5.1 - Situace řešené oblasti s vyznačením záplavového území pro Q100 [8][11]

Obr. 5.2 - Poloha limnigrafické stanice Brno – Poříčí [14]

Obr. 5.3 – Jez Riviéra km 39,855 [13]

Obr. 5.4 - Přehled významnějších povodní na Svatce a Svitavě v Brně [1]

Obr. 7.1 - schematizace spřaženého 1D a 2D modelu

Obr. 7.2 Schematizace zájmové oblasti – stávající stav

Obr. 7.3 Schematizace zájmové oblasti – návrhový stav

Obr. 7.4 – Rozdělení drsností povrchů ve výpočtové síti

Obr. 8.1 - Základní prostředí programu BASEMENT

Obr. 8.2 - Prostředí programu BASEMENT

Obr. 8.3 – Nadefinovaný spřažený 1D/2D numerický model

Obr. 8.4 – Parametry a vykreslení profilu

Obr. 8.5 - Zadaná geometrie 1D modelu

Obr. 8.6 - Zásuvný modul BASEmesh.

Obr. 8.7 - Vstup pro Quality mesh

Obr. 8.8 – Quality mesh a Quality nodes

Obr. 8.9 – Propojování 1D a 2D modulů

Obr. 8.10. Propojovací soubor

Obr. 8.11 – Výsledky hydraulických výpočtů – mapa hloubek



## 12. Seznam tabulek

Tab. 5.1 – N-leté průtoky v profilu Brno - Poříčí [6]

Tab. 5.2 - Historické údaje o průtocích pro Brno – Pisárky dle [13]

Tab. 5.3 – N-leté průtoky [2]

Tab. 6.1 Základní charakteristika SO 1.1

Tab. 6.2 Základní charakteristika SO 1.2

Tab. 6.3 Základní charakteristika SO 1.3

Tab. 6.4 Základní charakteristika SO 1.4

Tab. 6.5 Základní charakteristika SO 2.1

Tab. 6.6 Základní charakteristika SO 2.2

Tab. 6.7 Základní charakteristika SO 2.3

Tab. 6.8 Základní charakteristika SO 2.4

Tab. 6.9 Základní charakteristika SO 2.5

Tab. 6.10 Základní charakteristika SO 2.6

Tab. 6.11 Základní charakteristika SO 3

Tab. 6.12 Základní charakteristika SO 4

Tab. 7.1 – Hodnoty drsností pro 2D oblast dle Manninga

## 14. Seznam příloh

A. Průvodní a technická zpráva

B. Výkresová dokumentace

B.1. Situace širších vztahů

B.2. Celková situace stavby

B.3. Podrobný podélný profil Svratky - Stávající stav

B.4. Podrobný podélný profil Svratky - Návrhový stav PB

B.5. Podrobný podélný profil Svratky - Návrhový stav LB

B.6. Vzorové příčné řezy navržených PPO

C. Výstupy z hydraulických výpočtů

C.1. Mapy hloubek

C.1.1. Mapa hloubek pro Q20, stávající stav

C.1.2. Mapa hloubek pro Q100, stávající stav

C.1.3. Mapa hloubek pro Q100 neovlivněný, stávající stav

C.1.4. Mapa hloubek pro Q100, návrhový stav

C.2. Mapy rychlostí

C.2.1. Mapa rychlostí pro Q20, stávající stav

C.2.2. Mapa rychlostí pro Q100, stávající stav

C.2.3. Mapa rychlostí pro Q100 neovlivněný, stávající stav

C.2.4. Mapa rychlostí pro Q100, návrhový stav

C.3. Mapy rozlivů

C.3.1. Mapa rozlivů stávající stav

C.3.2. Mapa rozlivů návrhový stav

D. Fotodokumentace